

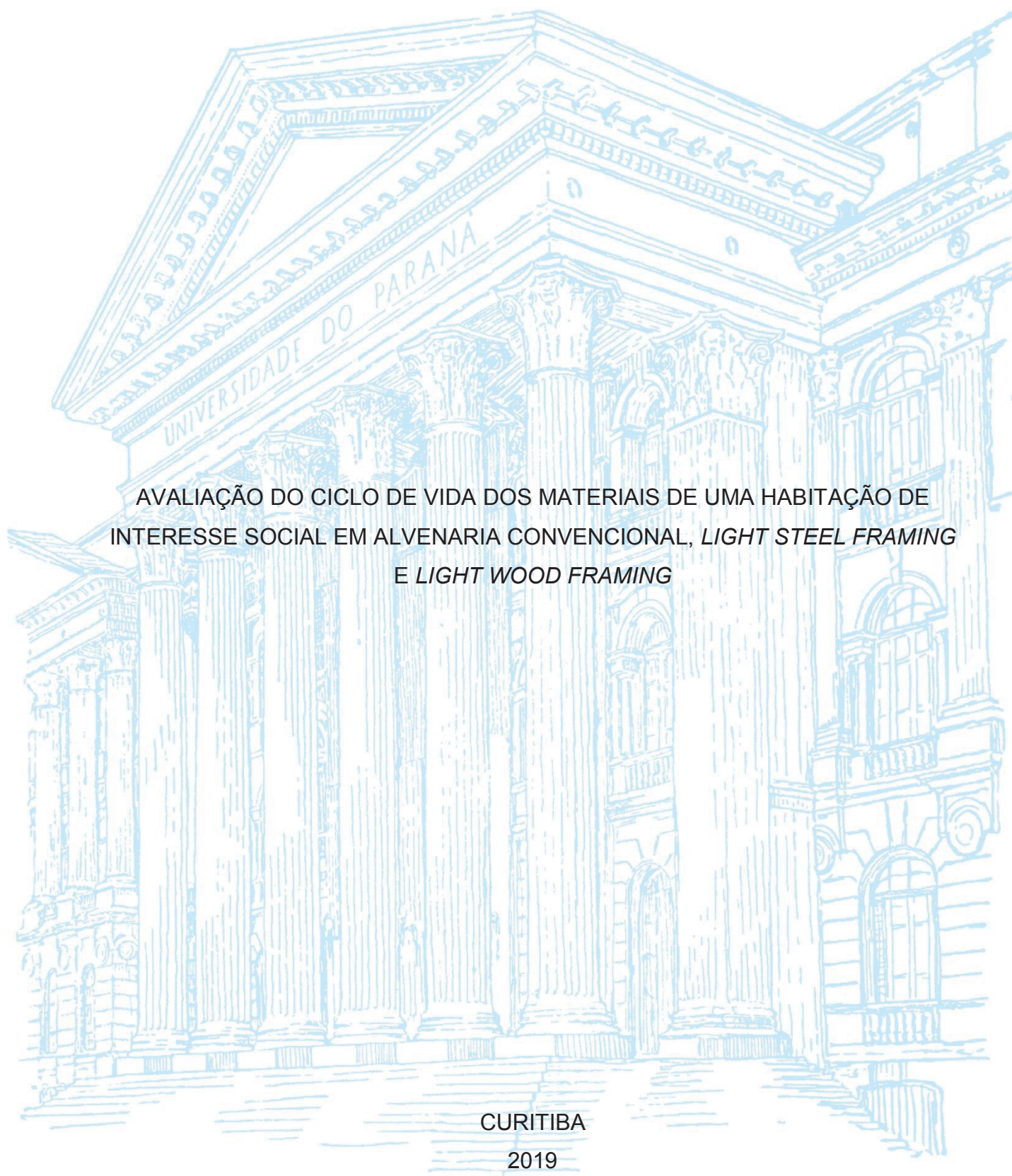
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VALÉRIA MAYUMI KUSHIMA RAMOS

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS DE UMA HABITAÇÃO DE
INTERESSE SOCIAL EM ALVENARIA CONVENCIONAL, *LIGHT STEEL FRAMING*
E *LIGHT WOOD FRAMING*

CURITIBA

2019



VALÉRIA MAYUMI KUSHIMA RAMOS

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS DE UMA HABITAÇÃO DE
INTERESSE SOCIAL EM ALVENARIA CONVENCIONAL, *LIGHT STEEL FRAMING*
E *LIGHT WOOD FRAMING*

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área
de Concentração em Gestão, Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Adriana de Paula Lacerda
Santos

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- R175a Ramos, Valéria Mayumi Kushima
Avaliação do ciclo de vida dos materiais de uma habitação de interesse social em alvenaria convencional, light steel framing e light wood framing [Recurso eletrônico] / Valéria Mayumi Kushima Ramos – Curitiba, 2019.
- Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil.
Orientadora: Adriana de Paula Lacerda Santos
1. Alvenaria - Construção civil. 2. Construção civil - Impactos ambientais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Santos, Adriana de Paula Lacerda. III. Título.

CDD: 693.21



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de VALÉRIA MAYUMI KUSHIMA RAMOS intitulada: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS MATERIAIS DE UMA HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL EM ALVENARIA CONVENCIONAL, LIGHT STEEL FRAMING E LIGHT WOOD FRAMING, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 04 de Abril de 2019.



ADRIANA DE PAULA LACERDA SANTOS
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


CASSIA MARIA LIE UGAYA
Avaliador Externo (UTFPR)


MARCELL MARIANO CORRÊA MACENO
Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Gilson e Terumi, por todo o apoio, incentivo e compreensão ao longo de toda a minha vida.

Ao meu irmão Henrique, que apesar de ser o caçula, auxiliou-me com sabedoria em diversos momentos dessa trajetória.

À minha tia Sandra, pelas palavras de incentivo para que eu alcançasse os meus objetivos.

Ao meu namorado Rodrigo, pelo amor e companheirismo, esteve sempre disposto a me ajudar com o que quer que fosse.

Aos meus amigos do mestrado Drielle, Julianna, Pedro, Thaisa que compartilharam comigo momentos de alegria e de angústia ao longo desses dois anos.

Aos meus amigos do intercâmbio Ana Beatriz, Cláudio e Paola, que apesar da distância continuam presentes no meu dia a dia.

À minha orientadora professora Adriana, pelos ensinamentos, incentivo e confiança ao longo desses dois anos de desenvolvimento da dissertação.

Ao professor Marcell, por sanar as muitas dúvidas sempre com paciência e pelas sugestões à minha pesquisa.

À professora Cássia da UTFPR, pelos valiosos conhecimentos transmitidos e disponibilidade em contribuir com esta dissertação.

Ao professor Sérgio Tavares pelas sugestões prestadas a esta dissertação.

Às minhas amigas de longa data Letícia, Roberta, Emanuella e Marina, ainda que distantes fisicamente, tenho um carinho enorme.

À CAPES, pelo auxílio financeiro.

A todos os profissionais que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, que se dispuseram a dedicar o seu tempo.

Obrigada a todos vocês que embarcaram nessa jornada comigo! O apoio de cada um foi essencial para chegar até aqui.

RESUMO

A construção civil figura entre os principais setores responsáveis pelos maiores impactos ambientais no mundo, parte devido à indústria do cimento. Como alternativas ao sistema construtivo em alvenaria convencional (AC), que é amplamente utilizado no Brasil e que consome grandes quantidades de cimento, existem sistemas inovadores como o *light wood framing* (LWF) e o *light steel framing* (LSF). O objetivo desta dissertação foi descrever o processo de avaliação do ciclo de vida dos materiais utilizados em uma edificação em AC, LWF e LSF para identificar os impactos ambientais. Como estudo de caso foi selecionada uma habitação de interesse social (HIS) padrão para pré-dimensionamento das estruturas e quantificação de materiais. A ACV foi realizada no *software* SimaPro com uso da base de dados Ecoinvent e do método IMPACT 2002+. Foram avaliadas as contribuições nas categorias de acidificação aquática, acidificação terrestre, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre e eutrofização segundo: i) os materiais de construção utilizados em cada fase do ciclo de vida (pré-operação, operação e pós-operação) para os três sistemas; ii) as etapas da construção (subestrutura, superestrutura, vedações e cobertura) para os três sistemas; iii) a comparação entre os três sistemas construtivos ; e ii) a comparação entre os dados da base adaptados e os originais. Na AC, de modo geral os materiais que mais impactaram as categorias avaliadas foram o bloco cerâmico, o cimento Portland e a telha cerâmica; no LWF foram a chapa de gesso, o OSB e a telha cerâmica; no LSF foram o aço e o tratamento de zincagem. A etapa pré-operacional foi a mais relevante para todos os sistemas construtivos. A maioria das categorias mostrou que o LSF apresentou as maiores contribuições para os impactos em análise, ao passo que o LWF apresentou as menores participações. As conclusões deste trabalho contribuem para a literatura nacional crescente de ACVs na construção civil e nas tomadas de decisão acerca de materiais e sistemas construtivos mais sustentáveis ambientalmente.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida. Alvenaria convencional. *Light wood framing*. *Light steel framing*. Impactos ambientais.

ABSTRACT

Civil construction is among the main sectors responsible for the greatest environmental impacts in the world, partly due to the cement industry. As alternatives to the conventional masonry system (CA), which is widely used in Brazil and consumes large quantities of cement, there are innovative systems such as light wood framing (LWF) and light steel framing (LSF). The aim of this work was to describe the process of evaluating the life cycle of the materials used in a building in AC, LWF and LSF to identify environmental impacts. As a case study, a standard social housing (HIS) was selected for the pre-dimensioning of structures and quantification of materials. The ACV was performed in the SimaPro software using the Ecoinvent database and the IMPACT 2002+ method. The contributions in the categories of aquatic acidification, terrestrial acidification, global warming, ozone layer depletion, aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity and eutrophication were evaluated according to: i) the building materials used in each phase of the life cycle (pre-operation, operation and post-operation) for the three systems; ii) the construction stages (substructure, superstructure, walls and roofing) for the three systems; iii) the comparison between the three construction systems; and iii) the comparison between the adapted database and the original one. In AC, the materials that most affected the categories evaluated were ceramic block, Portland cement and ceramic tile; in the LWF were gypsum board, OSB and ceramic tile; in the LSF were steel and zinc coating treatment. The pre-operational stage was the most relevant for all construction systems. Most of the categories showed that the LSF presented the largest contributions to the impacts under analysis, while the LWF showed the smallest participations. The conclusions of this work contribute to the growing national LCA literature on construction and decision making about more environmentally sustainable building materials and systems.

Keywords: Life cycle assessment. Conventional masonry. Light wood framing. Light steel framing. Environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONSTRUÇÃO EM ALVENARIA CONVENCIONAL DE BLOCOS CERÂMICOS	22
FIGURA 2 – JUNTAS DE AMARRAÇÃO	23
FIGURA 3 – COMPOSIÇÃO DE LAJE COM VIGOTAS PRÉ-MOLDADAS.....	24
FIGURA 4 – SEÇÕES TRANSVERSAIS PARA VIGOTAS E MATERIAIS PARA ENCHIMENTO DE LAJES	25
FIGURA 5 – TIPOS MAIS COMUNS DE TRELIÇA.....	25
FIGURA 6 – ELEMENTOS PRIMÁRIOS DE ESTRUTURA DE MADEIRA	28
FIGURA 7 – BALLOON FRAME E PLATFORM FRAME	29
FIGURA 8 – COMPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO INTERNO E EXTERNO DOS PAINÉIS TECVERDE	30
FIGURA 9 – DETALHE DOS MONTANTES NO ENCONTRO DOS PAINÉIS TECVERDE	31
FIGURA 10 – FABRICAÇÃO DOS PAINÉIS TECVERDE.....	31
FIGURA 11 – ESQUEMA DE CONSTRUÇÃO EM LIGHT STEEL FRAMING.....	34
FIGURA 12 – EXECUÇÃO DOS QUADROS ESTRUTURAIS EM LSF	35
FIGURA 13 – FASES DE UMA ACV	40
FIGURA 14 – ESQUEMA DE CONVERSÃO ICV PARA AICV.....	44
FIGURA 15 – TIPOS DE ABORDAGEM DE IMPACTOS AMBIENTAIS	51
FIGURA 16 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	59
FIGURA 17 – MODELO DE HABITAÇÃO POPULAR.....	61
FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DE DESTINO FINAL DOS MATERIAIS	68
FIGURA 19 – SUPERESTRUTURA EM ALVENARIA CONVENCIONAL	71
FIGURA 20 – ESTRUTURA PARA TELHADO NOS SISTEMAS EM AC E LWF	72
FIGURA 21 – SUPERESTRUTURA EM LWF	75
FIGURA 22 – SUPERESTRUTURA EM LSF	79
FIGURA 23 – SISTEMA DE PRODUTO DA ACV	83
FIGURA 24 – CORTE DE 5% NA VISUALIZAÇÃO DA REDE.....	85
FIGURA 25 – IMPACTOS DAS ETAPAS DA CONSTRUÇÃO NA HABITAÇÃO EM AC.....	91

FIGURA 26 – IMPACTOS DAS ETAPAS DA CONSTRUÇÃO NA HABITAÇÃO EM LWF	95
FIGURA 27 – IMPACTOS DAS ETAPAS DA CONSTRUÇÃO NA HABITAÇÃO EM LSF	98

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – DISTRIBUIÇÃO % DA MASSA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL	18
GRÁFICO 2 – IMPACTOS DAS FASES DA ACV NA HABITAÇÃO EM AC	91
GRÁFICO 3 – IMPACTOS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E PROCESSOS UTILIZADOS NA PRÉ-OPERAÇÃO DA HABITAÇÃO EM AC	92
GRÁFICO 4 – IMPACTOS DAS FASES DA ACV NA HABITAÇÃO EM LWF	94
GRÁFICO 5 – IMPACTOS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO UTILIZADOS NA PRÉ-OPERAÇÃO DA HABITAÇÃO EM LWF	96
GRÁFICO 6 – IMPACTOS DAS FASES DA ACV NA HABITAÇÃO EM LSF	97
GRÁFICO 7 – IMPACTOS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO UTILIZADOS NA PRÉ-OPERAÇÃO DA HABITAÇÃO EM LSF	99
GRÁFICO 8 – COMPARATIVO ENTRE OS IMPACTOS DAS HABITAÇÕES EM AC, LWF E LSF	100
GRÁFICO 9 – COMPARATIVO ENTRE A BASE DE DADOS GENÉRICA E A ADAPTADA.....	102

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PRINCIPAIS IMPACTOS DO SETOR DA CONSTRUÇÃO E EDIFICAÇÕES.....	19
QUADRO 2 – MATRIZ PEDIGREE PARA QUALIDADE DOS DADOS NA ACV.....	42
QUADRO 3 – EXEMPLOS DE CATEGORIAS DE IMPACTO SEGUNDO A ABRANGÊNCIA.....	43
QUADRO 4 – MÉTODOS DE AICV	48
QUADRO 5 – MÉTODOS DE AICV CONFORME AS CATEGORIAS DE IMPACTO	49
QUADRO 6 – DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS CONFORME O SISTEMA CONSTRUTIVO.....	62
QUADRO 7 – VUP MÍNIMA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	67
QUADRO 8 – DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	68
QUADRO 9 – QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO EM AC	73
QUADRO 10 – DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS GERADOS NA DESCONSTRUÇÃO DA HIS EM AC	74
QUADRO 11 – DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS GERADOS NA DESCONSTRUÇÃO DA HIS EM LWF.....	77
QUADRO 12 – DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS GERADOS NA DESCONSTRUÇÃO DA HIS EM LSF.....	81
QUADRO 13 – MATERIAIS SELECIONADOS NA BASE DE DADOS.....	86
QUADRO 14 –CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS SEGUNDO AS ETAPAS DA CONSTRUÇÃO	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – QUANTIDADE DE MATERIAIS DA AC PARA REPOSIÇÃO DURANTE A OPERAÇÃO NA HABITAÇÃO EM AC.....	74
TABELA 2 - QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO EM LWF.....	76
TABELA 3 – QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA REPOSIÇÃO DURANTE A OPERAÇÃO NA HABITAÇÃO EM LWF.....	77
TABELA 4 - QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO EM LSF.....	80
TABELA 5 – QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA REPOSIÇÃO DURANTE A OPERAÇÃO NA HABITAÇÃO EM LSF.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	- Alvenaria convencional
ACV	- Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	- Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
CEF	- Caixa Econômica Federal
EI	- Energia incorporada
GWP	- Potencial de aquecimento global (<i>Global Warming Potential</i>)
HIS	- Habitação de interesse social
IBICT	- Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	- Inventário do Ciclo de Vida
LCA	- Avaliação do Ciclo de Vida (<i>Life Cycle Assessment</i>)
LSF	- <i>Light steel framing</i>
LWF	- <i>Light wood framing</i>
MCMV	- Minha Casa Minha Vida
NBR	- Norma Brasileira
OSB	- <i>Oriented Strand Board</i>
RSL	- Revisão Sistemática da Literatura
SETAC	- Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>)
UNEP	- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA (<i>United Nations Environment Programme</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivos específicos.....	16
1.2	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	16
1.3	PRESSUPOSTOS.....	17
1.4	JUSTIFICATIVA	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1	CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL.....	21
2.1.1	Alvenaria com tijolos cerâmicos.....	22
2.2	CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA COM SISTEMAS INOVADORES.....	26
2.2.1	<i>Light wood framing</i> (LWF)	27
2.2.2	<i>Light steel framing</i> (LSF)	33
2.3	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	36
2.3.1	Histórico e contextualização	37
2.3.2	Limitações de uma ACV	39
2.3.3	Estrutura de uma ACV	40
2.3.4	Base de dados para ACV	45
2.3.5	Métodos de AICV	47
2.3.6	ACVs na construção civil	52
3	MÉTODO DE PESQUISA	58
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	58
3.2	ESTUDO DE CASO	60
3.3	PROTOCOLO DE ESTUDO DE CASO	63
3.3.1	Revisão da literatura.....	63
3.3.2	Pré-dimensionamento estrutural e levantamento quantitativo de materiais ..	65
3.3.3	Desenvolvimento da ACV	66
3.3.4	Resultados, análises e considerações finais.....	69
4	PRÉ-DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL E LEVANTAMENTO QUANTITATIVO DE MATERIAIS.....	71
4.1	ALVENARIA CONVENCIONAL	71
4.2	LIGHT WOOD FRAMING	75
4.3	LIGHT STEEL FRAMING	78

5	DESENVOLVIMENTO DA ACV	82
5.1	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO	82
5.1.1	Definição da função	82
5.1.2	Unidade funcional	82
5.1.3	Fluxo de referência	82
5.1.4	Sistema de produto	82
5.1.5	Limites do sistema	83
5.1.6	Critério de corte	84
5.1.7	Qualidade dos dados	84
5.1.8	Considerações do estudo	85
5.2	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	86
5.2.1	Cadastro de materiais	87
5.2.2	Alocação	87
5.3	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA	88
6	RESULTADOS E ANÁLISES.....	90
6.1	IMPACTOS DO SISTEMA EM ALVENARIA CONVENCIONAL.....	90
6.2	IMPACTOS DO SISTEMA EM <i>LIGHT WOOD FRAMING</i>	94
6.3	IMPACTOS DO SISTEMA EM <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	97
6.4	COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS CONSTRUTIVOS.....	100
6.5	COMPARAÇÃO DA BASE DE DADOS ADAPTADA E GENÉRICA	101
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
	REFERÊNCIAS	106
	APÊNDICE A – COBERTURA E CORTE DO ESTUDO DE CASO.....	119
	APÊNDICE B – QUANTITATIVO PARA ALVENARIA CONVENCIONAL	120
	APÊNDICE C – QUANTITATIVO PARA LIGHT WOOD FRAMING	123
	APÊNDICE D – QUANTITATIVO PARA LIGHT STEEL FRAMING	125
	APÊNDICE E – TRANSPORTE DOS MATERIAIS NA PRÉ-OPERAÇÃO E OPERAÇÃO	127
	APÊNDICE F – CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS NO SISTEMA CONSTRUTIVO EM AC 130	
	APÊNDICE G – CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS NO SISTEMA CONSTRUTIVO EM LWF.....	133
	APÊNDICE H – CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS NO SISTEMA CONSTRUTIVO EM LSF.....	136

ANEXO A – ÍNDICES PARA MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	139
--	------------

1 INTRODUÇÃO

A construção civil figura entre os setores mais importantes para a economia mundial e está diretamente relacionada ao desenvolvimento social e econômico de um país. Dentre os fatores que contribuem para a sua relevância estão a geração e distribuição de renda e criação de empregos (AUSTRALIAN CONSTRUCTION INDUSTRY FORUM, 2014; FIRJAN, 2014; LOPES, 2011).

No cenário brasileiro o setor se destaca por apresentar uma participação média no PIB de 5,6% (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2017), além de ser considerado um termômetro da situação econômica do país e movimentar grandes volumes de recursos materiais, humanos e financeiros (FIRJAN, 2014; HORVATH, 2004; MENEGUCI, 2018).

Por outro lado, estima-se que o setor também seja responsável pelo consumo de 14% do total de água utilizada, de 40% da energia gerada e pela emissão de 30% de dióxido de carbono no mundo (NEW ZEALAND GREEN BUILDING COUNCIL, 2016; UNEP, 2009; WGBC, 2016; YEHEYIS et al., 2013). No Brasil, mais de 50% de todo o resíduo sólido urbano gerado é proveniente das atividades de construção e demolição (BRASIL, 2012).

Ao analisar as indústrias dentro do setor da construção, Carreira, Re'em e Tarin (2015) indicaram que a fabricação de cimento é a principal emissora dos gases de efeito estufa, a que tem os maiores índices de consumo de água e de ocupação de terra, além de ser a maior geradora de resíduos e poluidores da água e da atmosfera. Considerando todas as indústrias de todos os setores econômicos do país, a produção do cimento é a 8ª maior quanto aos impactos mencionados.

Uma possibilidade para reduzir os impactos ambientais causados pelo setor da construção civil e agravado pela indústria do cimento é a substituição do sistema construtivo convencional por sistemas inovadores.

O sistema convencional é composto por elementos estruturais em concreto armado e vedação em blocos cobertos por revestimento (PILOTTO e VALLE, 2011; VASQUES e PIZZO, 2014). Já os sistemas inovadores são aqueles não abrangidos por normatização técnica e que sejam soluções alternativas ao processo convencional (BRASIL, 2016a).

Dentre os sistemas considerados como inovadores no Brasil estão o *light wood framing* (LWF), que utiliza estruturas leves em madeira, e o *light steel framing* (LSF),

com estruturas leves em aço (CALDAS, 2016; CALDAS et al., 2017; MASS, 2017; MONICH, 2012).

Comparados ao sistema convencional, seus processos de construção são racionalizados, com menores índices de desperdício, mais rapidez na construção e maior qualidade da edificação, sendo ambos bastante utilizados nos Estados Unidos e Europa (ARNOLD, 2011; FERRY, 1999; LAROCA, 2002; RODRIGUES; CALDAS, 2016; SOTSEK; SANTOS, 2018).

Na literatura foram encontrados diversos estudos que apresentaram esses sistemas construtivos como uma possível solução para os problemas ambientais agravados pelo uso massivo do cimento nas edificações (GUARDIGLI, 2014; LIU et al., 2016; MAODUS et al., 2016; MOTUZIENĖ et al., 2016; PAJCHROWSKI, Grzegorz et al., 2014).

No entanto, não foi encontrado na literatura nacional e internacional um estudo ambiental comparativo que avaliasse o sistema convencional e tais sistemas inovadores, o que poderia contribuir com uma visão mais ampla e auxiliar tomadas de decisão.

A ferramenta de gestão ambiental Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é comumente aplicada para avaliar as contribuições ambientais de diferentes produtos ou serviços. Seu uso na construção faz o balanço das entradas e saídas ao longo do ciclo de vida da edificação, contabilizando as contribuições de cada material e processo, que gera ao final o balanço dos impactos ambientais causados pela fabricação, uso e pós-uso da construção (ABNT, 2009a).

Nesse sentido, esta pesquisa contribui para avaliar, em termos ambientais, o desempenho do sistema construtivo em AC, que pode ser considerado a referência do que é atualmente realizado no Brasil, e dos sistemas pré-fabricados em LWF e LSF.

Estes últimos possuem o DATec, documento emitido pelo Ministério das Cidades que possibilita utilizar tecnologias, materiais ou sistemas inovadores em construções financiadas pela Caixa Econômica Federal. Assim, podem ser aplicados em empreendimentos como os do programa Minha Casa Minha Vida, em que o público-alvo é a população de baixa renda, faixa em que o déficit habitacional brasileiro é o maior. Podendo unir a eficiência e rapidez das construções ao utilizar esses sistemas em prol da redução do déficit habitacional.

No contexto apresentado, a presente dissertação pretende responder ao seguinte problema de pesquisa: Como a aplicação da ferramenta ACV em uma habitação de interesse social (HIS) pode auxiliar na comparação de impactos ambientais provenientes das fases pré-operacional, operacional e pós-operacional das construções em AC, LSF e LWF?

1.1 OBJETIVOS

Descrever a ACV para uma HIS em AC, LSF e LWF e identificar seus impactos ambientais e comparar os desempenhos entre os sistemas construtivos.

1.1.1 Objetivos específicos

- Identificar a contribuição dos materiais nos impactos ambientais das etapas pré-operacional, operacional e pós-operacional para cada sistema construtivo;
- Identificar a contribuição das etapas da construção nos impactos ambientais para cada sistema construtivo;

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O presente estudo se trata de uma simulação, com aplicação de dados extraídos de trabalhos acadêmicos, documentos técnicos, artigos científicos e de bases de dados. Os resultados apresentados, portanto, são estimativas para o tema desta pesquisa.

A definição da estrutura foi realizada com auxílio de normas, especialistas e bibliografia técnica, de modo que a solução estrutural adotada se baseou nas orientações dos profissionais, não fazendo parte do escopo verificar soluções mais interessante em termos econômicos ou estéticos.

Foram considerados para a ACV os componentes da subestrutura, superestrutura, vedações e cobertura. Não fazem parte do escopo do estudo de ACV os acabamentos, pinturas, instalações elétricas, instalações hidráulicas, esquadrias e forros. Os itens comuns aos três sistemas construtivos também foram desconsiderados por partir da premissa de que os impactos seriam iguais e não contribuiriam para o estudo comparativo.

1.3 PRESSUPOSTOS

Foram identificados estudos nacionais que levantaram os impactos ambientais provenientes do uso de diferentes sistemas construtivos, os quais auxiliaram na elaboração das hipóteses do presente trabalho (CALDAS, 2016; CALDAS et al., 2017; MASS, 2017; MONICH, 2012; NETO, 2011; PALACIO, 2013; TAVARES, 2006).

Supõe-se que a alvenaria convencional é responsável pelos maiores impactos ambientais em comparação aos demais sistemas construtivos. Quanto ao desempenho entre a madeira e o aço, os estudos mencionados não compararam os dois materiais, no entanto espera-se que o LWF seja o sistema mais interessante ambientalmente por se tratar de um material renovável e natural.

1.4 JUSTIFICATIVA

A segunda metade do século XX foi marcada pelo surgimento de grupos para discussão dos impactos ambientais causados por atividades antropogênicas e da forma de crescimento insustentável que a sociedade havia adotado (HOGAN, 2007).

O primeiro evento em que diversos países industrializados e em desenvolvimento se reuniram para discutir questões ambientais e o desenvolvimento mundial foi em 1972, na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano, em Estocolmo (HOGAN, 2007).

Esse acontecimento resultou na criação do Programa das Nações Unidas Para o Meio Ambiente (PNUMA), que hoje contribui para disseminar a ideia de avaliação do ciclo de vida de materiais e serviços para o uso sustentável de recursos (HOGAN, 2007; PNUD, 2015).

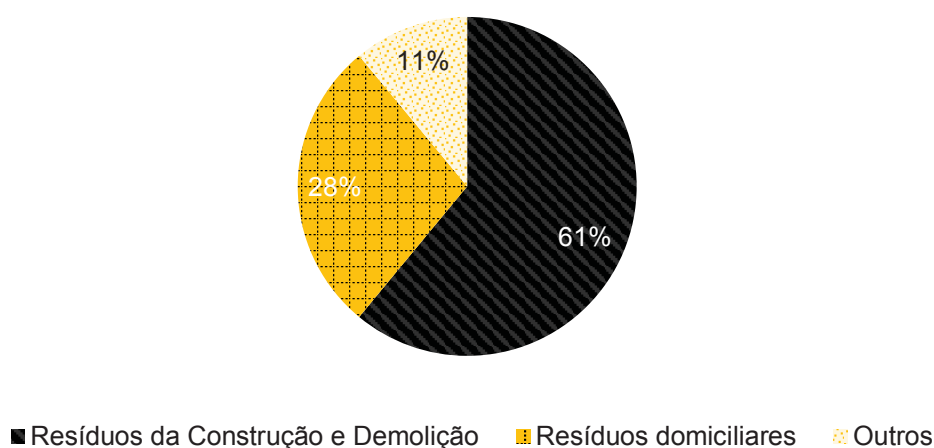
Vinte anos mais tarde ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Eco-92, e que posteriormente resultou na criação da Agenda 21 sobre o compromisso de cada país participante em solucionar problemas socioambientais (PLESSIS, 2002).

Em 1994 o Conselho Internacional de Pesquisa e Inovação na Construção (CIB) lançou a Agenda 21 para a construção sustentável. O documento apresenta os principais desafios e estratégias para a sustentabilidade na construção. Dentre os problemas abordados estão o alto consumo de recursos e a quantidade de resíduos

de construção e demolição que chega a corresponder a 13% de total depositado em aterros no mundo (CIB, 1999).

No Brasil, segundo o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2010), os resíduos provenientes de atividades de construção e demolição representam até 61% de todo o resíduo sólido urbano gerado em um município (GRÁFICO 1).

GRÁFICO 1 – DISTRIBUIÇÃO % DA MASSA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL



FONTE: BRASIL (2010).

Além de impactos na área ambiental, Sev (2009) menciona que o setor da construção e suas edificações apresentam relevância econômica e social (QUADRO 1). Suas atividades influenciam a qualidade de vida e seus produtos têm vida útil mais longa que a de outras indústrias, portanto as edificações devem ser projetadas para minimizar impactos ao longo de todo o seu ciclo de vida (SEV, 2009).

Como estratégias para reduzir esses impactos, estão a redução no consumo de materiais, a utilização de equipamentos eficientes, a seleção de materiais com baixa energia embutida, o uso de fontes energéticas alternativas, o aproveitamento de ambientes já construídos e a não expansão para áreas naturais, a coleta de água da chuva, a priorização de materiais recicláveis, a redução da geração de resíduos e a adoção de métodos e materiais inovadores de maior eficiência (PLESSIS, 2002; SEV, 2009).

QUADRO 1 – PRINCIPAIS IMPACTOS DO SETOR DA CONSTRUÇÃO E EDIFICAÇÕES

Impacto	Ambiental	Social	Econômico
Extração de matéria-prima e consumo, relacionado à depleção de recursos	•		•
Mudança no uso da terra, incluindo eliminação da flora existente	•	•	•
Uso de energia e emissões associadas de gases de efeito estufa	•		•
Outras emissões internas e externas	•		•
Degradação estética		•	
Uso da água e geração de água residual	•		•
Necessidade de transporte aumentada, dependendo do local de obra	•	•	•
Geração de resíduos	•		•
Oportunidades de corrupção		•	•
Dano a comunidades, inclusive por meio de projetos e materiais inadequados		•	•
Riscos para a saúde nos locais de trabalho e para ocupantes do edifício		•	•

FONTE: SEV (2009).

A ferramenta ACV tem sido utilizada no cenário internacional para identificar escolhas ambientais mais sustentáveis, auxiliando principalmente no levantamento de impactos ao meio ambiente e à saúde humana. Ela os relaciona a processos do ciclo de vida, o que possibilita identificar as substâncias mais relevantes para um determinado impacto, de modo que o seu uso se tornou obrigatório em países como Alemanha, França, México, Peru e Chile (FILHO; JUNIOR; LUEDEMANN, 2016).

Segundo a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN, 2014), estudos de impactos ambientais em projetos de construção são classificados como um vetor estratégico de gestão, pois possibilita aumentar a eficiência produtiva, auxiliar em tomadas de decisão e criar produtos de alto desempenho (FILHO, JUNIOR e LUEDEMANN, 2016).

Com o objetivo de aumentar a eficiência das construções ao longo do seu ciclo de vida e de adotar materiais e processos mais sustentáveis, Campestrini et al. (2015) sugere novos processos, metodologias, materiais, tecnologias e métodos construtivos a fim de contribuir com práticas construtivas mais sustentáveis e competitivas.

Dois sistemas construtivos amplamente utilizados no cenário internacional, mas considerados inovadores no Brasil são o LSF e o LWF, ambos industrializados devido à fabricação externa ao canteiro de obras (MONAHAN; POWELL, 2011). Isso aumenta o controle de processos que envolvem a sua manufatura e instalação, confere maior qualidade ao produto final, diminui os desperdícios e reduz os custos (MORAES; LIMA, 2009; MOURA; SÁ, 2014).

Do outro lado, utilizado em grande parte das construções no Brasil, a alvenaria de blocos cerâmicos é caracterizada por se utilizar de técnicas artesanais, além dos altos índices de perdas de materiais em obra, que chegam a mais de 80% para o cimento, 45% para a areia e 91% para argamassas (FORMOSO et al., 1996; NUNES; JUNGES, 2008; VASQUES; PIZZO, 2014).

A substituição do sistema construtivo convencional para sistemas inovadores como o LWF e LSF possibilita tornar o processo de construção mais eficiente. Ambos os sistemas possuem a emissão do Documento de Avaliação Técnica (DATec), documento exigido para o financiamento pela Caixa Econômica Federal de empreendimentos que utilizam materiais e processos inovadores no país, contribuindo para elevar o número de construções de HIS e reduzir o déficit habitacional (BRASIL, 2018a; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2018).

Para comparar os desempenhos dos três sistemas construtivos, foi realizada uma busca pela literatura científica a fim de identificar estudos comparativos entre o sistema construtivo convencional e os sistemas pré-fabricados em LWF e LSF (RAMOS, SANTOS e MACENO, 2019).

De modo geral, os resultados foram mais favoráveis aos sistemas pré-fabricados, no entanto nenhuma das pesquisas abrangeu a avaliação dos três sistemas construtivos ao longo de todo o ciclo de vida. Portanto, observa-se uma lacuna que o presente trabalho propõe suprir com o desenvolvimento da ACV dos três sistemas construtivos (AC, LWF e LSF) e todas as fases do ciclo de vida, com a finalidade de contribuir com a literatura nacional e auxiliar tomadas de decisão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados conceitos relevantes à contextualização desta dissertação. Inicialmente são descritos os sistemas construtivos de AC, LWF e LSF. Na sequência apresenta-se o histórico da ferramenta ACV, informações sobre a sua estrutura e por fim o embasamento à sua aplicação à área da construção civil.

2.1 CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL

A construção convencional é aquela bem estabelecida em seu país, com grande disponibilidade de mão de obra habilitada para a sua execução e vasta aplicação nos canteiros de obras. Nas construções convencionais do Brasil predomina-se o uso do concreto armado e da alvenaria (VASQUES; PIZZO, 2014).

A execução desse sistema é caracterizada como empírica e “*in loco*”, composta por elementos estruturais como vigas, pilares e lajes em concreto e barras de aço, com vedação de blocos, rochas ou tijolos, podendo ou não conter argamassa para assentamento. Quanto ao revestimento das paredes, podem ser compostas por camadas de espessura variada de chapisco, emboço, reboco e massa corrida ou gesso (PILOTTO; VALLE, 2011; VASQUES; PIZZO, 2014).

Por ser um método antigo e aplicado à diversas construções de variadas características, possui menor custo relativo aos materiais e mão-de-obra comparado a métodos mais desenvolvidos devido à menor complexidade, ampla aplicação e aceitação, além de vantajoso economicamente para pequenos projetos. Ainda, tem flexibilidade quanto a alterações e adaptações do projeto (BALDWIN et al., 2009; VASQUES; PIZZO, 2014).

No entanto, devido à característica artesanal do processo de execução, não há um rígido controle de qualidade na construção, resultando em desperdícios e baixa produtividade. Além disso, o concreto armado possui elevada massa específica, que apesar de interessante como massa térmica e maior conforto ambiental interno, exige fundações reforçadas e consequente aumento nos custos (VASQUES; PIZZO, 2014).

A seleção de um sistema construtivo composto por seus materiais e processos deve considerar uma série de características para atender às necessidades do projeto de uma construção, desde as condições locais, ligadas ao ambiente físico e limitantes ao projeto, como a temperatura, os recursos naturais disponíveis, topografia,

disponibilidade de terra, recursos financeiros, condições de mercado, até questões socioculturais e político-econômicas (ex. faixa de renda, faixa etária predominante, legislação e nível de industrialização) (PICARELLI, 1986).

2.1.1 Alvenaria com tijolos cerâmicos

Por alvenaria entende-se o sistema construtivo composto por blocos, tijolos ou pedras que podem ser unidos por meio de um ligante, normalmente uma argamassa cimentícia (ABCP, 2013). A alvenaria mais comum é a de blocos cerâmicos (FIGURA 1) provenientes da extrusão e queima da argila moldada a aproximadamente 1000°C (AZEREDO, 1997).

FIGURA 1 – CONSTRUÇÃO EM ALVENARIA CONVENCIONAL DE BLOCOS CERÂMICOS



FONTE: GYURU (2010).

Os tijolos devem ser isentos de defeitos como trincas, deformações, diferenças na coloração e irregularidades, possuem seis, oito ou nove furos (YAZIGI, 2009) e devem seguir as especificações conforme as normas ABNT NBR 15270-1:2005 e ABNT NBR 15270-2:2005.

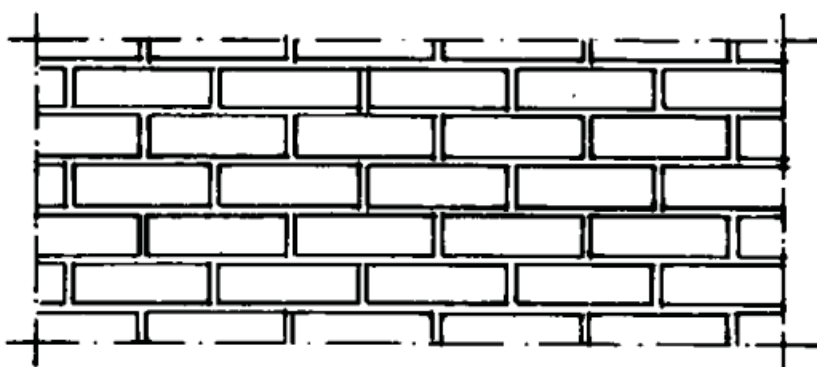
As juntas verticais e horizontais são preenchidas com argamassa de assentamento com no máximo 1 centímetro de espessura sem vazios (ABNT, 1984). A representação do seu traço deve iniciar com o aglomerante e sempre indicar a unidade trabalhada (SANTIAGO, 2007).

Segundo Borges (2009), em construções de pequeno porte normalmente não são realizadas sondagens no solo por serem dispensáveis e seu custo relativo ser muito alto, sendo comum o uso de estacas e vigas-baldrame para execução da fundação.

Inicialmente são concretadas as estacas e as vigas-baldrame que, na sequência, são impermeabilizadas. Depois lança-se uma camada de lastro de brita e de concreto magro, podendo haver variações dos materiais para execução do piso térreo de acordo com o projetista. Com a infraestrutura finalizada, inicia-se a alvenaria da fachada pelas extremidades da edificação, preenchendo além das juntas horizontais, as verticais para maior resistência (YAZIGI, 2009).

Ao utilizar blocos cerâmicos deve-se optar pelas juntas de amarração, ou seja, aquelas em que as juntas verticais são descontínuas (FIGURA 2), sendo necessário uso de meio-bloco em fiadas alternadas. Além disso, os furos dos blocos de vedação não devem estar dispostos na vertical ou na transversal ao plano da parede (ABNT, 1984; YAZIGI, 2009).

FIGURA 2 – JUNTAS DE AMARRAÇÃO



FONTE: NBR 8545 (ABNT, 1984).

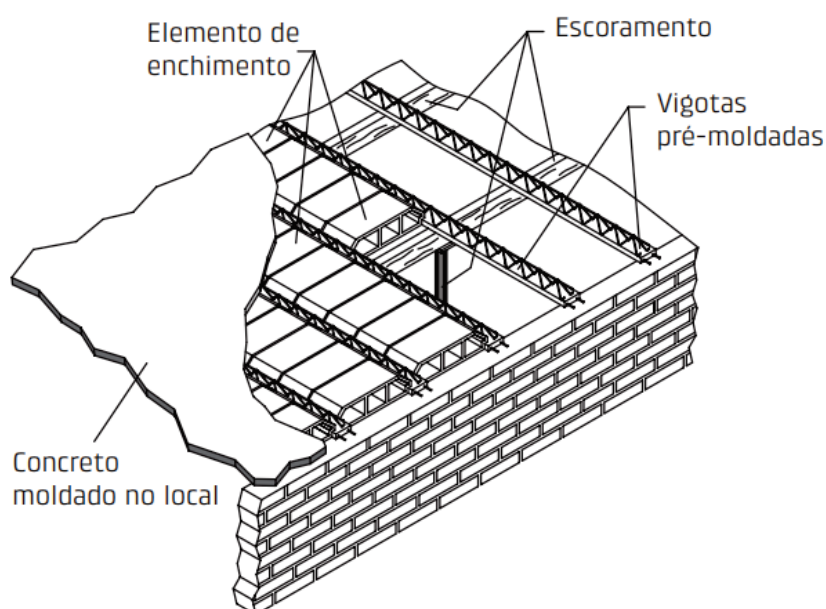
Acima dos vãos das portas e esquadrias são posicionadas vergas e abaixo as contra-vergas para absorver e redistribuir as cargas da região e evitar fissuras. São utilizados blocos-canaleta preenchidos com concreto 15 MPa e duas barras de aço de

diâmetro de 6,3 mm ou pré-moldadas. As vergas devem ter pelo menos 20 cm em cada lado para apoio, e as contra vergas 30 cm (YAZIGI, 2009).

Executada a alvenaria, as instalações são realizadas através de rasgos nos blocos para passagem de conduítes, tubulações e caixas elétricas. Depois, deve ser feito o revestimento das paredes, composto por camadas de espessura variada de chapisco, emboço, reboco e massa corrida ou gesso, nesta ordem de aplicação (PILOTTO; VALLE, 2011; VASQUES; PIZZO, 2014).

No sistema construtivo convencional normalmente as lajes são compostas por vigotas pré-moldadas e enchimento, que recebem uma capa de concreto, conforme ilustrado na FIGURA 3.

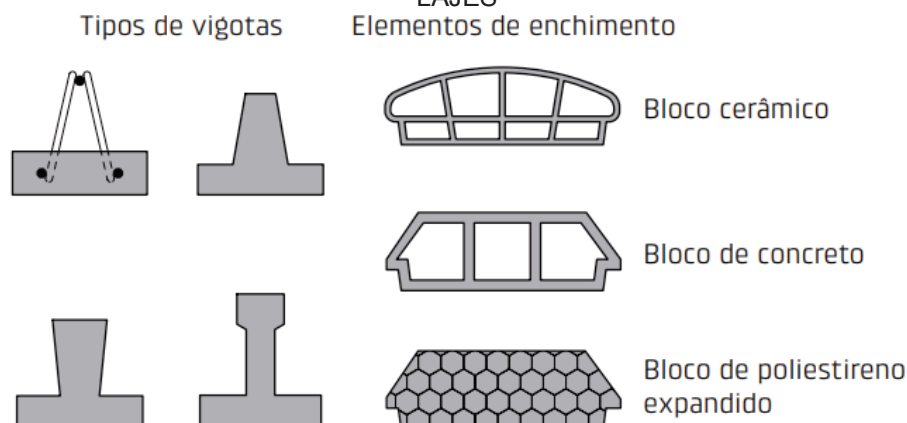
FIGURA 3 – COMPOSIÇÃO DE LAJE COM VIGOTAS PRÉ-MOLDADAS



FONTE: EL DEBS (2017).

Os elementos estruturais podem variar em sua seção transversal, podendo apresentar armadura interna ou exposta, com protensão ou não (MERLIN et al., 2005). Já como enchimento são utilizados blocos de concreto, de poliestireno expandido (EPS) ou lajotas cerâmicas (FIGURA 4).

FIGURA 4 – SEÇÕES TRANSVERSAIS PARA VIGOTAS E MATERIAIS PARA ENCHIMENTO DE LAJES



FONTE: EL DEBS (2017).

Para a cobertura é comum o uso de estruturas em madeira, chamadas de treliças ou tesouras. As vigas que sustentam o telhado podem ter diferentes geometrias, como as do tipo Howe, tipo Pratt ou tipo belga (FIGURA 5). Além delas, dependendo do tipo de telhamento escolhido, exigem-se outros elementos como ripas, caibros e terças (PFEIL e PFEIL, 2003).

FIGURA 5 – TIPOS MAIS COMUNS DE TRELIÇA



FONTE: PFEIL E PFEIL (2003)

De acordo com a inclinação definida para a cobertura deve ser escolhido o tipo de telha para vedação e isolamento térmico e acústico da construção. As mais comuns são as telhas cerâmicas, de fibrocimento e as metálicas (JUNIOR e MOLINA, 2010).

As telhas de cerâmica são comumente utilizadas em residências e são encontradas em diferentes modelos. Seu custo de mão-de-obra é superior aos demais e exige inclinações maiores. Tem boa resistência mecânica, durabilidade e isolamento termoacústico (JUNIOR e MOLINA, 2010).

Já as telhas de fibrocimento possuem custo mais baixo e sua instalação é mais rápida, no entanto o seu desempenho é inferior às telhas cerâmicas quanto aos critérios citados anteriormente (JUNIOR; MOLINA, 2010).

Quanto às telhas metálicas, são normalmente utilizadas em construções industriais e também são instaladas com rapidez. Alguns modelos não possuem resistência mecânica e bom desempenho termoacústico (JUNIOR; MOLINA, 2010).

2.2 CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA COM SISTEMAS INOVADORES

A pré-fabricação na construção é descrita por Mao et al. (2013) como uma ferramenta que possibilita a evolução aos métodos convencionais. É definida como um processo industrializado com a fabricação e pré-montagem de componentes, elementos ou módulos, antecipadas à instalação no local definitivo (GOODIER; GIBB, 2007; JAILLON; POON; CHIANG, 2009; MAO et al., 2013).

Com o desenvolvimento de novos materiais, processos e tecnologias na construção civil, é necessário que todos eles sejam avaliados para garantir um desempenho satisfatório. No entanto, um entrave comum é a falta de normatização que garanta qualidade e segurança dos edifícios.

Nesse sentido, surgiu o Sistema Nacional de Avaliação Técnica, o SiNAT, como uma iniciativa que fomenta inovações e favorece a competitividade do setor. O SiNAT foi criado em 2007 com o objetivo de padronizar os critérios de avaliação técnica de desempenho de processos e produtos inovadores no Brasil, além de dar diretrizes para a concessão do Documento de Avaliação Técnica, o DATec (BRASIL, 2016a; MITIDIERI, 2011).

Além disso, a concessão do DATec possibilita financiar HIS fabricadas com produtos ou sistemas inovadores em instituições públicas financeiras, como habitações do Programa Minha Casa Minha Vida por meio da Caixa Econômica Federal.

Fazem parte da comissão nacional do SiNAT representantes de entidades públicas, da cadeia produtiva da construção civil e de órgãos independentes (ligados a instituições de pesquisa, ensino, inovação tecnológica, normatização técnica e sustentabilidade na construção) (BRASIL, 2016a).

No processo para aprovação de um sistema ou produto inovador, o interessado deve solicitar a uma Instituição Técnica Avaliadora (ITA) a sua avaliação, que o submeterá a ensaios, avaliação de projeto e auditorias sobre o controle de qualidade do objeto avaliado e apresentará os resultados em Relatórios Técnicos de Avaliação

(RTA). Sendo aprovada pelo SiNAT, recebe então o DATec com validade de dois anos, após o qual deve ser renovado (BRASIL, 2016a).

Dentre as instituições autorizadas a atuarem como ITAs, estão o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (São Paulo), o Instituto de tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC (Paraná) e a Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS (Rio Grande do Sul) (BRASIL, 2017).

Dois sistemas tidos como inovadores e com DATec vigente atualmente são o LWF e o LSF, no entanto ambos os métodos construtivos são frequentemente utilizados fora do país há mais de um século.

O primeiro DATec emitido para o sistema construtivo em LWF foi requisitado pela empresa Tecverde e concedido pela primeira vez em 2013 (TECVERDE, 2016). Para o LSF, a empresa Saint-Gobain obteve o primeiro DATec também no ano de 2013, ambos renovados em 2018 e vigentes até 2020.

2.2.1 *Light wood framing* (LWF)

A construção conhecida como *light wood framing* (LWF), traduzida como estrutura leve de madeira, surgiu em meados no século XIX nos Estados Unidos, onde se popularizou devido à necessidade de construir habitações a custos mais baixos e que demandassem quantidades menores de madeira em relação aos sistemas usualmente utilizados (KOLB, 2008; MONTEYNE, 2004). Até os dias atuais é o sistema construtivo mais utilizado na América do Norte e no Japão para edificações habitacionais (ARNOLD, 2011).

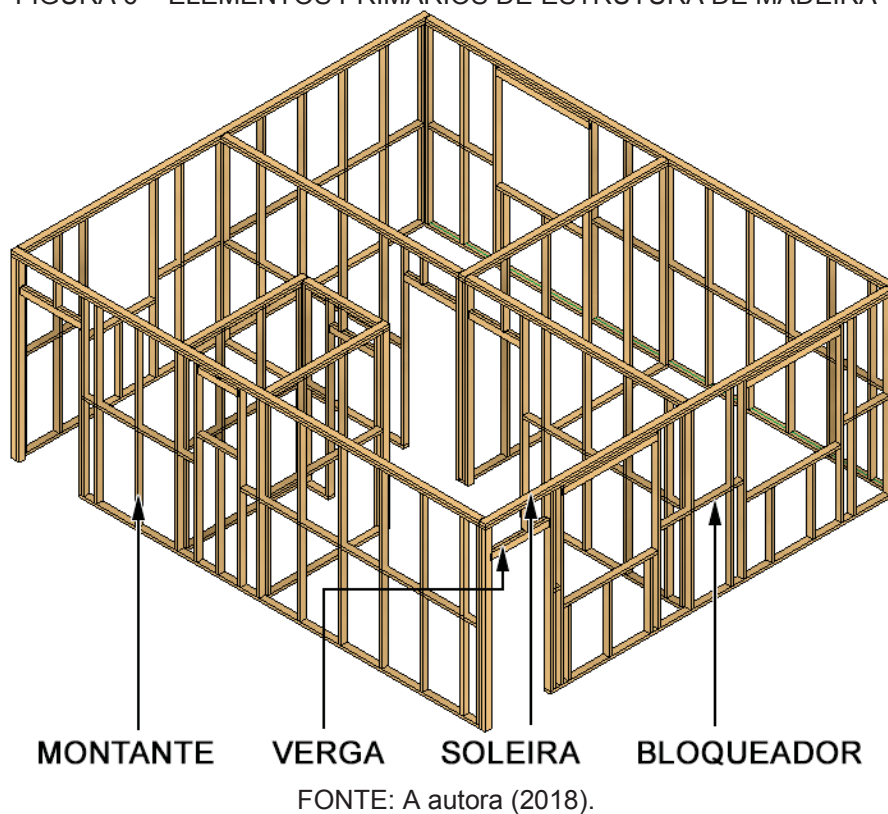
Quanto ao cenário nacional, apenas 7% das habitações no Brasil utilizam a madeira na constituição das paredes externas (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2010), apesar da grande oferta de pinus e eucalipto, duas das espécies mais comumente aplicadas na construção civil (SOTSEK; SANTOS, 2018).

Sua composição leva um conjunto de peças finas e leves de madeira pregadas que formam a estrutura e por materiais que a revestem, de modo que a conexão de todos esses elementos e a capacidade de contraventamento do invólucro garantem a resistência da edificação (MONTEYNE, 2004; THALLON, 2008).

As construções chamadas de *frame* compreendem elementos estruturais primários que inicialmente recebem as cargas e transferem aos elementos estruturais

secundários, que por sua vez levam à fundação. Compõem os elementos estruturais primários (FIGURA 6) os pilares (montantes), vigas (soleiras ou travessas), vergas e elementos de contraventamento, como os bloqueadores, e os elementos estruturais secundários e os que compõem os pisos (KOLB, 2008).

FIGURA 6 – ELEMENTOS PRIMÁRIOS DE ESTRUTURA DE MADEIRA

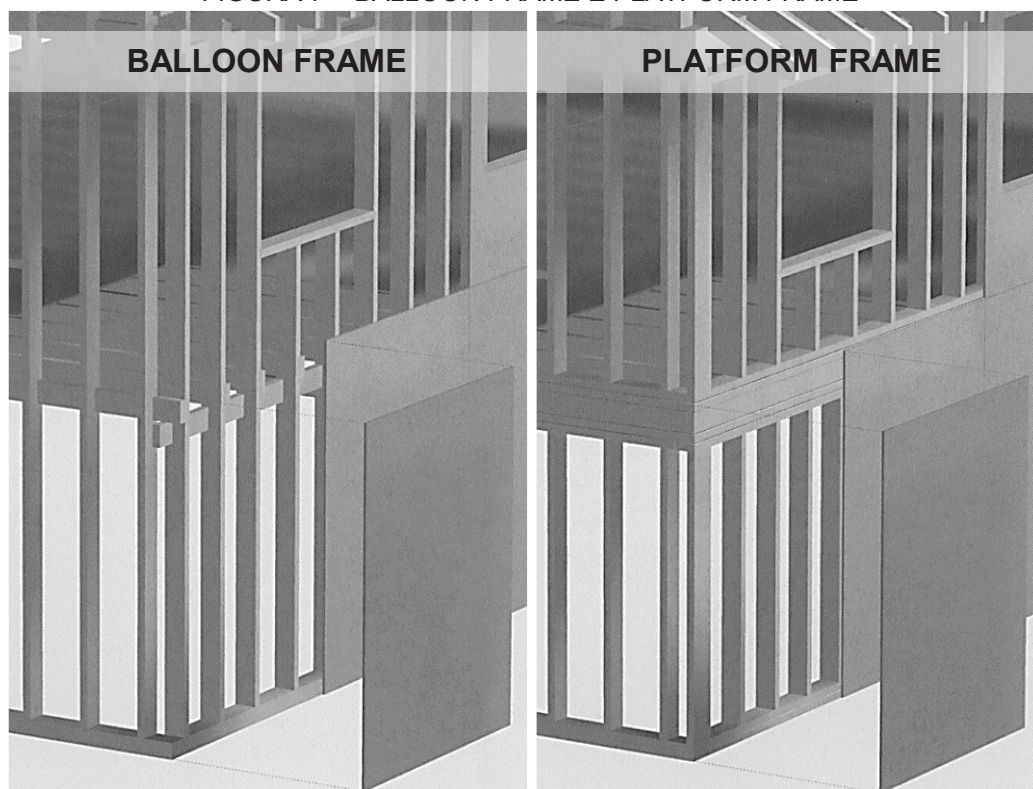


Duas formas de construção em *frame* de madeira mais conhecidas são a *balloon frame*, mais antiga, e a *platform frame* (FIGURA 7). As principais diferenças estão no comprimento dos montantes (peças verticais), conexão entre os pisos e sequência da construção (CAVANAGH, 1997; KOLB, 2008; MONTEYNE, 2004). Além disso, a *platform frame* é a forma aplicada no Brasil (BRASIL, 2018b).

A primeira é caracterizada por usar montantes estruturais contínuos ao longo de no mínimo dois andares, a laje dos entrepisos é constituída por vigas suportadas pelos montantes e todas as paredes devem ser erguidas antes de executar outros elementos. Já na *platform frame*, cada andar é construído de maneira isolada, com interrupção dos montantes em cada andar, as paredes compostas pelos montantes se apoiam na laje (ou plataforma) e o próximo andar é iniciado com a execução da

plataforma, instalação dos montantes desse andar e assim por diante (KOLB, 2008; MONTEYNE, 2004).

FIGURA 7 – BALLOON FRAME E PLATFORM FRAME



FONTE: Adaptado de KOLB (2008).

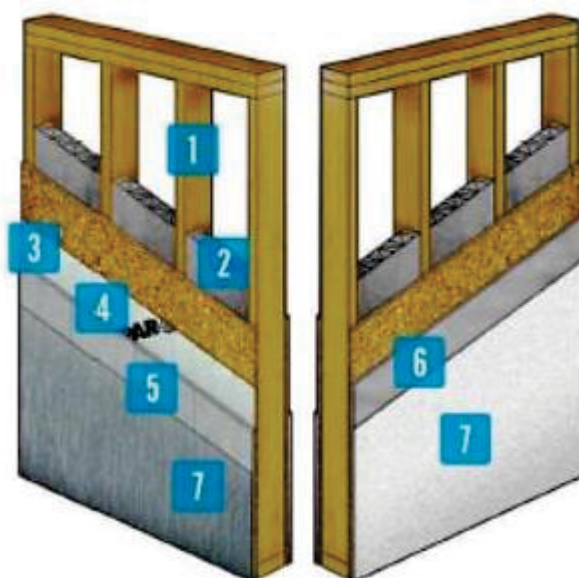
A *platform frame* é a forma de construção aprovada e utilizada no Brasil, conforme apresentado no DATec N° 020-C - Sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada - Tecverde (tipo light wood framing). Este relatório garante que, em caráter provisório, a normalização de sistemas construtivos e materiais inovadores, contendo informações sobre a sua metodologia e o seu desempenho, conforme as diretrizes de avaliação do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT) e foi utilizado para o desenvolvimento do projeto em LWF no presente trabalho (BRASIL, 2018b).

Dessa forma, o LWF Tecverde segue parâmetros construtivos específicos para as paredes externas e internas, pisos e a interface desses elementos com os demais, que podem ser de natureza convencional (SINAT, 2018b).

A composição das paredes (FIGURA 8) é formada pela soleira inferior, montantes e soleiras superiores duplas em madeira de Pinus com tratamento em autoclave com arseniato de cobre cromatado (*chromated copper arsenate* – CCA) (1),

isolamento térmico-acústico entre os montantes (2), com revestimento externo composto por chapa de OSB (*oriented strand board*) (3), membrana hidrófuga (4), placa cimentícia (5) e acabamento externo (7) e revestimento interno com chapa de OSB (3), chapa de gesso acartonado (6) e acabamento interno (7) (SINAT, 2018b; TECVERDE, 2016).

FIGURA 8 – COMPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO INTERNO E EXTERNO DOS PAINÉIS TECVERDE



FONTE: TECVERDE (2016).

As chapas de OSB também auxiliam na função estrutural e no contraventamento dos painéis de paredes (TECVERDE, 2016), sendo normalmente utilizadas no Brasil tiras de madeira de Pinus ou Eucalipto que aglutinadas com resina em uma direção e prensadas em alta temperatura com até 5 camadas cruzadas (GOUVEIA, 2001).

Nos cantos das paredes (FIGURA 9), onde há encontro entre os painéis, o encaixe é realizado com três montantes paralelos, sendo dois deles pertencentes a um dos painéis e devem ser orientados a 90° em relação aos demais (SINAT, 2018b).

O espaçamento máximo entre os montantes deve ser de 600mm, dimensão adotada nos testes de desempenho para habitações térreas realizados pelo DATec e confirmada como adequada para receber os carregamentos da estrutura conforme cálculo estrutural realizado por Neto (2003).

FIGURA 9 – DETALHE DOS MONTANTES NO ENCONTRO DOS PAINÉIS TECVERDE



FONTE: SINAT (2018b).

A fabricação desses painéis é totalmente industrializada, com a colocação dos materiais em camadas e abertura das esquadrias na fábrica, sendo transportados até o local da obra para instalação (FIGURA 10)

FIGURA 10 – FABRICAÇÃO DOS PAINÉIS TECVERDE



FONTE: TECVERDE (2016).

Com relação à fundação para o sistema LWF, a solução mais utilizada no Brasil é o radier, fundação rasa executada com concreto armado e armação superior e inferior (AZEREDO, 1997; ESPÍNDOLA, 2017; ESPINDOLA; INO, 2014; TECVERDE, 2016). No entanto, também podem ser adotadas sapatas corridas com vigas baldrame ou sapatas mais profundas com cinta de amarração, esta última mais empregada em regiões em que as camadas superficiais congelam em determinados períodos do ano (DIAS, 2005; THALLON, 2008).

Sobre os acabamentos do piso do pavimento térreo, acima do radier é aplicada uma camada de argamassa de assentamento e revestimento de piso cerâmico (SINAT, 2018b).

A composição da laje sob o telhado é formada por vigas de madeira, que recebem na face superior placas de OSB e na face inferior duas camadas de chapa de gesso (SINAT, 2018b).

Quanto ao telhado e seus elementos, Molina e Junior (2010) mencionam que uma solução comumente utilizada é a colocação de treliças pré-fabricadas espaçadas no mínimo a cada 60 cm até 120 cm, recebendo diferentes tipos de camadas de acordo com a telha escolhida. Uma solução de baixo custo é a aplicação de telhas convencionais de cerâmica, que demandam a instalação de manta para estanqueidade e ripas para posicionamento das telhas.

Para o dimensionar a estrutura de madeira de uma construção, a norma brasileira em vigência é a NBR 1790 – Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997), também utilizada para LWF, já que ainda não existe uma norma específica para esse tipo de edificação.

Os elementos devem ser verificados quanto à limitação das tensões atuantes e das deformações, de modo que aqueles que sofrem esforços de compressão classificam-se em peças curtas, medianamente esbeltas e esbeltas, de acordo com o índice de esbeltez (λ) e devem ser verificadas quanto à segurança e estabilidade, (ABNT, 1997).

Inicialmente o pré-dimensionamento deve considerar as cargas permanentes e acidentais que os elementos da cobertura recebem e são transferidos para os elementos de piso compostos pelos perfis I e chapas de OSB que recebem solicitação de flexão simples e para simplificação de cálculo são verificados para compressão, tração e cisalhamento (SACCO, 2008).

Esses perfis I, representados pelas soleiras superiores e vigas de piso, comprimem os montantes, que devem ser verificados para compressão simples e estabilidade no eixo de maior inércia (SACCO, 2008).

Para peças curtas ($\lambda \leq 40$) dispensa-se a avaliação de efeitos de flexão, fazendo o pré-dimensionamento apenas para a condição de segurança para compressão simples, em que os esforços de compressão atuantes devem ser menores que os resistentes. Para peças medianamente esbeltas ($40 < \lambda \leq 80$) e esbeltas ($80 < \lambda \leq 140$), ainda que somente solicitadas à compressão simples, devem

ser considerados os efeitos de flexão devido à excentricidade accidental e avaliadas para flexo-compressão (ABNT, 1997).

O uso de materiais renováveis, uso da madeira como incorporador de dióxido de carbono e de baixo consumo energético no processamento, redução no tempo de obra devido à pré-fabricação, menor variabilidade no preço da matéria prima, flexibilidade da arquitetura e baixo desperdício são algumas das vantagens apresentadas no uso do LWF em comparação aos métodos tradicionais de construção (ESPÍNDOLA, 2017; ESPINDOLA; INO, 2014; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; LAROCA, 2002).

Durante a ocupação da construção, a madeira possibilita aumentar o conforto térmico devido à baixa condutividade térmica e apresenta menor risco de desabamento em caso de incêndio quando comparado a outros tipos de construção como o *steel framing* (LAROCA, 2002).

Por outro lado, por ser um sistema ainda em expansão no país, existe o questionamento quanto à sua credibilidade perante os usuários e os setores madeireiro e da construção em enxergar o seu potencial, a necessidade de mão de obra qualificada, grande incidência de construções com baixa qualidade devido à falta de conhecimento técnico dos profissionais e o tratamento inadequado da madeira que levam à redução da durabilidade da edificação (ESPÍNDOLA, 2017; ESPINDOLA; INO, 2014; SOTSEK; SANTOS, 2018).

2.2.2 *Light steel framing* (LSF)

As construções estruturadas em perfis leves de aço zincado conformados a frio fechadas com chapas finas são conhecidas como *light steel framing* (LSF) e apesar de ser considerado inovador no Brasil, esse sistema construtivo alternativo à construção convencional começou a ser utilizado nos Estados Unidos e Inglaterra no final do século XIX (JACKSON, 1998)

A sua ampla aplicação e aceitação na construção foi um lento processo que demandou a solução de questões como a baixa qualidade do aço produzido, problemas ligados às propriedades da matéria-prima, a sua falta de oferta e o baixo custo da madeira (FERRY, 1999; JACKSON, 1998).

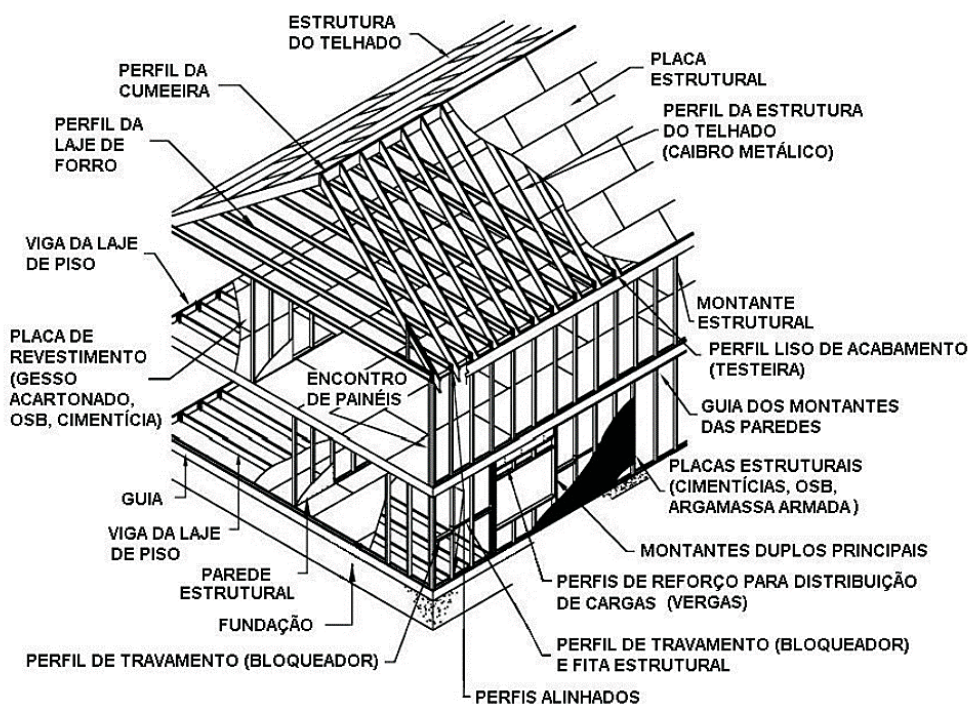
Com a melhora da qualidade do aço e aumento da competitividade sobre o LWF, o LSF se popularizou principalmente nos países do hemisfério norte, como

Estados Unidos, Inglaterra, Japão e Canadá (FERRY, 1999; RODRIGUES; CALDAS, 2016).

A fabricação dos perfis utilizados na estrutura do LSF é proveniente de bobinas de aço zincado de alta resistência revestimento de zinco ou liga alumínio-zinco, que segue a nomenclatura própria de acordo com a sua função (RODRIGUES; CALDAS, 2016).

Assim como no LWF, os montantes são perfis verticais alocados no máximo a cada 400 mm ou 600 mm ao longo das paredes, que em conjunto com as guias superior e inferior, análogas às soleiras do LWF, formam os painéis (FIGURA 11) (BRASIL, 2016b).

FIGURA 11 – ESQUEMA DE CONSTRUÇÃO EM LIGHT STEEL FRAMING



FONTE: RODRIGUES (2010).

Nos casos em que é necessário realizar o travamento dos montantes para evitar a flambagem são instalados bloqueadores na seção central do perfil para montantes até 2,50 metros ou nos dois terços de painéis de 2,75 metros a 3,00 metros. e fitas diagonais na face externa dos quadros estruturais. Podem ser utilizados em substituição a esses elementos chapas OSB como componentes de contraventamento. Já nas aberturas de portas e janelas, são instalados montantes de

reforço e sobre eles perfis duplos que atuam como vergas (BRASIL, 2016b; RODRIGUES; CALDAS, 2016).

A composição padrão das paredes contém os perfis estruturais metálicos, isolamento térmico acústico, barreira hidrófuga e placas de OSB em ambas as faces. O revestimento da fachada do sistema pode ser realizado com placa cimentícia, *siding* vinílico ou com acabamento sobre as placas de OSB, e as paredes internas recebem chapas de gesso para *drywall*. (BRASIL, 2016b).

A execução pré-fabricada dos painéis das paredes se inicia com a fixação das guias e dos montantes, seguidos pelos bloqueadores e fitas diagonais (FIGURA 12). A norma exige que nas áreas molhadas devem ser instaladas placas cerâmicas até o teto e espaçamento máximo entre montantes de 400 mm.

FIGURA 12 – EXECUÇÃO DOS QUADROS ESTRUTURAIS EM LSF



FONTE: SINAT (2018).

As construções em LSF apresentam boa durabilidade, o processo industrializado garante precisão e rapidez na construção, menos desperdício de materiais comparado às construções convencionais devido ao processo racional, a matéria-prima é totalmente reciclável e incombustível (RODRIGUES; CALDAS, 2016). Além disso, Ferry ressalta a qualidade superior do LSF em comparação LWF por não ser suscetível a infestações, umidade e outros problemas relacionados à matéria orgânica e não uniforme (FERRY, 1999).

Por outro lado, seu custo superior aos sistemas convencionais e ao LWF concentram a aplicação do LSF em edificações comerciais em que é necessária rapidez na execução da obra (FERRY, 1999), além de exigir mão de obra especializada e verificação do pré-dimensionamento estrutural, independente da complexidade da construção.

Para garantir a segurança e estabilidade de uma construção em LSF, deve ser verificado o dimensionamento da estrutura de aço conforme as normas brasileiras NBR 14762:2010 e NBR 15253:2014 que apresentam critérios mínimos para elementos em LSF e suas ligações.

As guias devem ser verificadas para compressão, os montantes das paredes internas para flexocompressão e tração de forma isolada, os montantes das paredes externas à flexo-compressão e flexo-tração. Já as vigas de piso e as vergas devem ser dimensionadas para o momento fletor, cisalhamento e combinação de cisalhamento, momento fletor e eventuais esforços que venham a sofrer, como o esmagamento da alma (RODRIGUES; CALDAS, 2016).

Sob o telhado, a laje é constituída por perfis metálicos estruturantes, revestidos na parte superior por chapas de OSB e abaixo por duas chapas de gesso (BRASIL, 2016b)..

A cobertura de uma edificação em LSF pode ser estruturada com o prolongamento dos montantes até os banzos superiores ou a partir do dimensionamento de tesouras, como a do tipo Howe, dimensionando a treliça para os esforços de compressão e tração.

2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A ACV é uma técnica de gestão ambiental que tem como objetivo quantificar o impacto ambiental de produtos ou serviços ao longo do seu ciclo de vida, identificando as causas que podem abranger desde a extração de matérias-primas até o descarte final (ABNT, 2009a).

Seus resultados auxiliam em análises para tomadas de decisão que podem melhorar o desempenho ambiental de um produto ou de uma etapa no ciclo de vida, assim como em comparações de diferentes materiais de mesma função, mas que possuem diferenças devido ao processo produtivo ou composição (ABNT, 2009a; SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006).

A necessidade de reduzir os impactos ambientais de produtos ou serviços exige uma ferramenta que identifique as contribuições ao longo do ciclo de vida, de modo que a ACV se adequa aos objetivos do estudo ao rastrear os impactos com base nos dados inseridos para avaliação.

2.3.1 Histórico e contextualização

Nos últimos 30 anos houve um crescente interesse acerca dos impactos ambientais causados por diferentes atividades e materiais, o que expôs divergências entre métodos, terminologias e dados utilizados desde a década de 1960, época em que surgiram os primeiros estudos. Nos Estados Unidos eram inicialmente chamados de *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA), enquanto na Europa eram conhecidos como *Ecobalance* (CURRAN, 2006; U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2006; UNEP, 1996).

Nesse contexto, surgiu a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), uma ferramenta de gestão ambiental que auxilia a tomada de decisão ao avaliar os impactos ambientais de um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida, ou seja, desde a extração das matérias-primas que o compõem até a sua disposição final (ABNT, 2009a; UNEP, 1996).

Devido à necessidade de uma grande quantidade de informações e à complexidade do método, diferentes organismos internacionais têm se unido desde os anos 1980 para desenvolver padronizações, promover eventos e elaborar documentos com diretrizes para profissionais e organizações.

A Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) (em inglês *United Nations Environmental Programme* – UNEP) se uniram para a criação da Iniciativa para o Ciclo de Vida (em inglês *Life Cycle Initiative* – LCI) em 2002, que promove a divulgação por meio de eventos e da publicação de guias para profissionais e organizações.

Em 1997 foi lançada a primeira versão de normas de padronização direcionada à ACV da série ISO 14000 (*International Organization for Standardization*) (U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2006; UNEP, 1996), hoje com sua última correção realizada em 2014: ISO 14040 (ABNT, 2009a) e 14044 (2009b), que trata de aspectos técnicos e organizacionais.

No Brasil, o primeiro livro publicado na área é de autoria de Chehebe (1997), que faz panorama sobre a aplicação da ISO 14000 à ACV e apresenta aos empresários benefícios e limitações da ferramenta. Atualmente, iniciativas como a Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV), que realiza a cada dois anos o Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida – CBGCV, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (Ibict), o Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida (PBACV) e a Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida (Rede ACV) incentivam a produção de conteúdo, o desenvolvimento de banco de dados nacional e a disseminação da importância da ACV para a sociedade.

A criação de uma ACV para um produto exige a entrada de informações que o compõem (Ex. recursos utilizados, processos necessários à sua montagem, meio de transporte e distância percorrida, energia utilizada) e levam consigo as respectivas quantificações (Ex. 10 kWh de energia elétrica), que geram como informação de saída resíduos e emissões para o ar, a água e a terra, causando um certo impacto ambiental.

Dessa forma, diversas informações podem ser extraídas de modo a embasar a tomada de decisões, como no desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos e na definição de estratégias, na identificação das características ambientais de um produto ou serviço, em estudos comparativos entre materiais e processos alternativos, na identificação das áreas que necessitam de maior atenção para mitigar impactos e rastreamento de suas origens, no levantamento dos impactos em nível local e global e das emissões para o ar, a água e a terra, ou ainda como uma ferramenta de suporte para certificação ambiental (GUINÉE et al., 2001; HEIJUNGS et al., 1992; U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2006; UNEP, 1996).

A ACV é caracterizada por ser integrativa e orientada ao produto. Ela analisa toda a cadeia de processos e produtos, diferentemente de outras ferramentas (Ex. Avaliação de riscos, Avaliação de impacto ambiental (em inglês – *Environmental Impact Assessment* - EIA)) que fazem uma análise parcial.

Portanto evita que ao realizar alterações ao longo do ciclo de vida o impacto seja substituído por outro ao fazer uma análise holística que possibilita analisar, por exemplo, se a utilização de um certo material reciclado é realmente mais interessante ambientalmente e se houve a migração de impactos entre fases do ciclo de vida ou mesmo entre países (U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2006; UNEP, 1996).

2.3.2 Limitações de uma ACV

Apesar de a ACV ser uma ferramenta que possibilita avaliar todos os processos, atividades e materiais ao longo do ciclo de vida a qualidade dos seus resultados é dependente das informações de entrada.

No entanto, não existe um banco de dados continuamente atualizado e que contenha informações de todas as regiões no mundo, e ainda que o fosse, para tornar a sua concepção viável exigem-se simplificações, o que inclui utilizar dados médios ou similares, de regiões diversas ou ainda de outro período, afetando na qualidade da ACV, princípio mencionado na NBR ISO 14040 (2009a; GUINÉE et al., 2001).

O processo de elaboração é complexo e trabalhoso, uma vez que exige o conhecimento dos processos envolvidos e dos respectivos dados. Isso leva a um grande tempo dispendido e muitas vezes a informações desatualizadas ou inacessíveis (WHITE; SHAPIRO, 1993).

Além disso, o autor deve tomar uma série de decisões no processo de desenvolvimento de ACV, como: a definição do sistema do produto, das categorias de impacto a serem avaliadas, do método de avaliação de impacto escolhido, do banco de dados utilizado no inventário do ciclo de vida e dos valores para ponderação dos impactos ambientais. Essas definições tornam o processo subjetivo (UNEP, 1996) e normalmente a comparação com outras ACVs inviável (MOURAD; GARCIA; VILHENA, 2002).

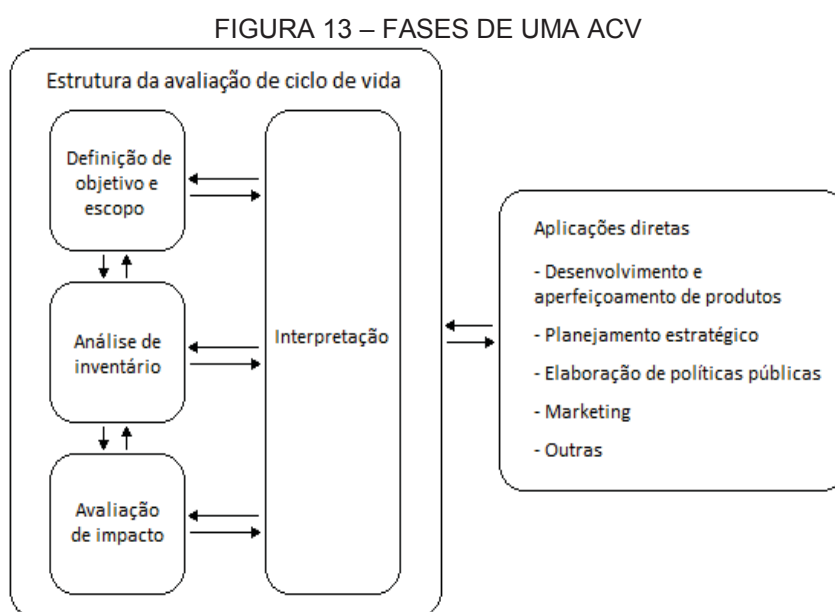
Ainda, a complexidade pode mascarar distorções de informações e exclusão de dados que aumentariam os impactos. Portanto a transparência de todo o seu desenvolvimento é essencial para garantir a integridade dos resultados (FILHO; JUNIOR; LUEDEMANN, 2016).

Segundo um estudo realizado por Lidiana Zocche (ZOCHE, 2014), foram encontradas 32 limitações após a análise de 183 teses e dissertações acadêmicas que realizaram ACV no Brasil, tanto externas à pesquisa (como falta de apoio do governo, indisponibilidade de bancos de dados nacionais e empresas que divulgam apenas dados globais e não reais dos processos) como relacionadas às decisões do desenvolvedor (ex. escolha das categorias de impacto avaliadas, definições de cobertura temporal, espacial e tecnológica e estabelecimento de critérios mais objetivos nas definições realizadas).

2.3.3 Estrutura de uma ACV

Para desenvolver um estudo de ACV, é necessário estruturá-la em quatro fases: Definição de objetivo e escopo, Análise de inventário, Avaliação de impacto e Interpretação (FIGURA 13).

O fluxo de informações entre elas deve ser constantemente revisto para verificar a consistência e garantir a completeza, o que caracteriza o desenvolvimento de uma ACV como um processo iterativo (ABNT, 2009a).



FONTE: Adaptado de ABNT ISO 14040 (ABNT, 2009a).

Na primeira fase, deve primeiramente ser definido o Objetivo de uma ACV, que compreende definir a aplicação do estudo, as razões para a sua execução, a identificação do público-alvo e se os resultados pretendem ser utilizados de forma comparativa (ABNT, 2009a). Para a definição do Escopo, devem ser levantados:

- **O sistema de produto:** por meio do sistema de produto é que a ACV é modelada, pois é composta por todos os processos elementares (são as menores unidades de análise no ciclo de vida, com entradas e saídas quantificadas) necessários ao ciclo de vida do produto estudado (ABNT, 2009a).
- **As funções do sistema do produto ou dos sistemas (em estudos comparativos):** são as finalidades do sistema ou sistemas analisados (ABNT, 2009a; SILVA et al., 2014).
- **A unidade funcional:** é a função mensurada em uma unidade (UGAYA, 2012).

- **A fronteira do sistema:** estabelece os processos elementares que fazem parte do sistema do produto analisado (ABNT, 2009a).
- **Procedimentos de alocação:** formas de distribuição das entradas e saídas de um processo quando há a geração de mais de um produto ou em sistemas de reciclagem (ABNT, 2009a; SILVA et al., 2014). A alocação pode ser baseada em propriedades físicas (massa ou energia) e em fatores econômicos (SILVA et al., 2014).
- **Categorias de impacto selecionadas:** classes representativas de questões ambientais (ex. acidificação, potencial de aquecimento global) às quais os resultados da fase do Inventário do Ciclo de Vida são relacionados (ABNT, 2009a).
- **Método(s) de impacto selecionado(s):** modelo que relaciona os resultados encontrados na fase de Inventário do Ciclo de Vida às categorias de impacto. Ainda não existe consenso sobre como realizá-lo de forma consistente e acurada (ABNT, 2009a).
- **Qualidade dos dados:** refere-se à questões relacionadas à cobertura temporal (idade e período mínimo de coleta), cobertura geográfica (área em que os dados deveriam ser coletados), cobertura tecnológica (indicação da tecnologia específica sobre a qual os dados devem se referir), precisão (medida de variabilidade de um dado), completeza (percentagem medida ou estimada dos fluxos representativos), representatividade, consistência (aplicação uniforme do método aos elementos analisados), reprodutibilidade (fornecimento das informações sobre o desenvolvimento da ACV que permitam executá-lo independentemente e obter os mesmos resultados), fontes dos dados e incerteza das informações (ABNT, 2009b).

Weidema e Wesnæs (1996) desenvolveram uma matriz que avalia a incerteza dos dados segundo indicadores de confiabilidade, representatividade e correlações temporal, geográfica e tecnológica (QUADRO 2).

São dadas pontuações para cada um dos cinco critérios, como por exemplo (1,2,3,4,5), em que a confiabilidade foi máxima (1) por ter seus dados verificados e a correlação tecnológica recebeu a pior nota (5) por adotar uma tecnologia diferente para o produto ou serviço analisado.

QUADRO 2 – MATRIZ PEDIGREE PARA QUALIDADE DOS DADOS NA ACV

Pontuação do indicador	Confiabilidade	Representatividade	Correlação temporal	Correlação geográfica	Correlação tecnológica
1	Dados verificados baseados em medições	Dados representativos de uma amostra suficiente em um período adequado para eliminar flutuações	Menos de 3 anos de diferença ao ano de estudo	Dados da área em estudo	Dados das empresas, processos e materiais em estudo
2	Dados verificados parcialmente baseados em hipóteses ou dados não-verificados baseados em medições	Dados representativos de uma amostra menor, mas para períodos adequados	Menos de 6 anos de diferença	Dados médios de uma área maior, em que a área de estudo está incluída	Dados de processos e materiais em estudo, mas de diferentes empresas
3	Dados não-verificados parcialmente baseados em hipóteses	Dados representativos de uma amostra suficiente mas para períodos menores	Menos de 10 anos de diferença	Dados de área com condições similares de produção	Dados de processos e materiais em estudo, mas tecnologias diferentes
4	Estimativas qualificadas (ex. por especialistas)	Dados representativos de uma amostra menor e períodos menores, ou dados incompletos de amostra e período suficientes	Menos de 15 anos de diferença	Dados de área com condições de produção ligeiramente semelhantes	Dados de processos e materiais parecidos, mas mesma tecnologia
5	Estimativas não-qualificadas	Representatividade desconhecida ou dados incompletos de amostras e/ou períodos insuficientes	Dados de idade desconhecida ou mais de 15 anos de diferença	Dados de área desconhecida ou de condições muito diferentes de produção	Dados de processos ou materiais parecidos mas tecnologia diferente

FONTE: WEIDEMA E WESNÆS (1996).

- **Pressupostos:** considerações feitas ao longo da ACV, as quais devem ser adequadamente justificadas e registradas (ABNT, 2009a).
- **Limitações:** restrições do estudo (ex. falta de dados não dados não-representativos) (ABNT, 2009a).

- **Tipo de análise crítica:** a ACV pode ser analisada por especialista interno ou externo ou por partes interessadas (ABNT, 2009a), caso o estudo tenha a intenção de ser divulgado esta etapa deve ser realizada.

A primeira fase é considerada crucial para que o estudo seja bem conduzido devido à grande influência nas demais fases, de modo que quanto mais informações sejam fornecidas, maior a assertividade no resultado da ACV (MIETTINEN; HÄMÄLÄINEN, 1997).

A segunda fase, Inventário do Ciclo de Vida, consiste na coleta de dados, registro das informações relevantes nesse processo (ex. origem e modo de coleta do recurso) e as técnicas de cálculo, todos devidamente registrados no Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Os dados utilizados no estudo podem ser classificados em: dados primários (coletados especificamente para o estudo) e dados secundários (extraídos de bancos de dados e literaturas), este último considerado mais genérico por não representar especificamente a situação analisada (ISO 14049/TR, 2012).

Na terceira fase, a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), são levantados os resultados obtidos no ICV com as categorias de impacto definidas no escopo (UGAYA, 2012). Essas categorias de impacto podem ser classificadas segundo a sua influência, podendo abranger apenas alguma região geográfica (impacto local), todo o mundo (impacto global) ou ainda afetar diretamente o ser humano (impacto interno) (QUADRO 3).

QUADRO 3 – EXEMPLOS DE CATEGORIAS DE IMPACTO SEGUNDO A ABRANGÊNCIA

Impactos globais	Impactos locais	Impactos internos
Potencial de aquecimento global	Formação de ozônio fotoquímico	Toxicidade humana
Acidificação	Depleção de recursos renováveis	Acúmulo de compostos orgânicos voláteis
Eutrofização ou Nutrificação	Depleção de recursos não-renováveis	Ruídos
Depleção de ozônio estratosférico	Disposição de resíduos	Excesso de ruído
Consumo de água	Toxicidade dos ecossistemas	Geração de alergênicos

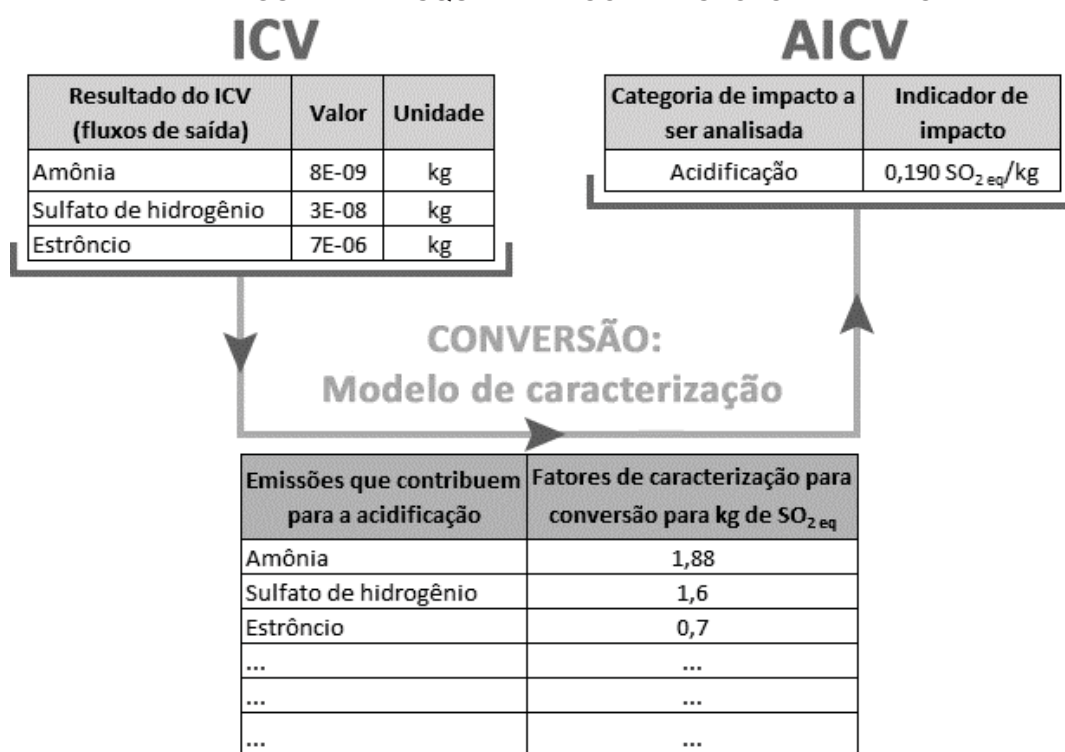
FONTE: TAVARES (2017)¹.

¹TAVARES, S. F. Notas de aula da disciplina de Sustentabilidade Ambiental Aplicada às Edificações da UFPR. Curitiba, 7. Abr. 2017. Slide.

Para que as categorias de impacto sejam quantificáveis, são necessários os indicadores de categoria, que servem como uma unidade para mensuração e estão atrelados ao mecanismo ambiental de causa (ABNT, 2009a). Dessa forma, para realizar a conversão das categorias de impacto em indicadores, é necessário que seja definido um modelo de caracterização, que contém os fatores de caracterização para converter os dados do ICV em indicadores e relacioná-los com as categorias de impacto (FIGURA 14), etapa chamada de caracterização.

Os métodos de AICV utilizam diferentes modelos de caracterização, que podem considerar diferentes combinações de substâncias emitidas para o cálculo do indicador de impacto, já que ela não é uma avaliação absoluta de todas as questões ambientais (ABNT, 2009a).

FIGURA 14 – ESQUEMA DE CONVERSÃO ICV PARA AICV



FONTE: A autora (2017).

Ainda, os métodos podem apresentar os resultados segundo dois níveis de impacto: como ponto médio (*midpoint*), segundo as categorias de impacto (os potenciais indicadores de impacto) ou como ponto final (*endpoint*), que são consideradas as consequências finais das categorias de impacto de ponto médio,

apresentados como danos, que são classificados em: saúde humana, ecossistema e recursos naturais (CAVALETT et al., 2013).

Após a caracterização, existem procedimentos opcionais que podem ser realizados: a normalização, o agrupamento e a ponderação. No primeiro, são convertidos em uma mesma unidade todos os valores dos indicadores de categoria de impacto (SILVA et al., 2014), útil na identificação de inconsistências e para identificar a significância relativa dos indicadores. No agrupamento, são reunidas as categorias de impacto conforme uma base nominal (ex. abrangência global, local ou interna), ou segundo uma hierarquia (ex. prioridade). A ponderação atribui pesos aos indicadores ou aos valores normalizados, sendo um elemento não embasado cientificamente e definido conforme a preferência do autor da ACV (ABNT, 2009b).

A quarta e última fase, a Interpretação, deve ser realizada ao longo das outras etapas para atender aos objetivos e escopo definidos. Identifica, por fim, a contribuição dos processos nos impactos ambientais, de forma a tornar essas informações como base para auxiliar em possíveis tomadas de decisão, constatação de melhorias e sugestões. (ABNT, 2009a; UGAYA, 2012).

2.3.4 Base de dados para ACV

Um dos principais pontos a serem considerados ao elaborar uma ACV é utilizar dados quantitativos confiáveis no ICV para se chegar a conclusões bem embasadas. No cenário nacional, no entanto, verifica-se a carência dessas informações, levando por vezes à utilização de bancos de dados internacionais para estudos de ACV brasileiros.

A organização conjunta UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (2011) criou um guia de Princípios de Orientação Global para Bancos de Dados de uma ACV, focado principalmente na necessidade de desenvolver bancos de dados para ACV em países emergentes.

Ele considera a mobilização global e a acessibilidade a informações autênticas para o desenvolvimento de conjuntos de dados como prioridades para que haja a interligação entre bancos de dados global, podendo levar inclusive à um alinhamento quanto aos formatos dos dados, facilitando conversões ou até a adoção de unidades comuns.

Apesar da escassez de bancos de dados locais, que é atualmente a principal limitação dos estudos desenvolvidos, tem ocorrido uma rápida evolução da ACV nos últimos dez anos no Brasil. O Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) tem assumido o papel de promover o desenvolvimento da ACV em território brasileiro, com a criação do Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV) (SOUZA et al., 2017).

Além disso, com o apoio da administração pública por meio do fornecimento de grandes quantidades de informações é possível contribuir com os dados de dados para ACV nacionais (UNEP, 2011). No entanto, enquanto essas informações não são disponibilizadas para aplicação nas ACVs nacionais, a utilização de bases de dados internacionais ainda é predominante.

A base de dados mais utilizada no mundo atualmente é a Ecoinvent, e foi selecionada para uso no presente trabalho. Ela possui o maior acervo mundial, com mais de 13.000 conjuntos de dados de diferentes áreas. Foi lançada em 2003 com a versão 1.01 pela iniciativa conjunta de escritórios e institutos federais suíços, sendo atualizada em 2007 com a versão 2 e em 2014 a versão 3. Atualmente está na quarta atualização (3.4) (ECOINVENT, 2018a).

Seus dados abrangem diferentes setores da indústria, com registros documentados e revisados por especialistas (PRÉ, 2016). Além disso, a base cita a origem das informações utilizadas, com a descrição da sua forma de coleta caso seja sejam dados primários ou a literatura utilizada, para dados secundários.

Quanto à sua abrangência geográfica, apresenta diferentes siglas de acordo com a disponibilidade de dados que a base dispõe. No caso da produção do clínquer, por exemplo, existe a opção específica do Québec (CA-QC), da China (CH), da Europa exceto Suíça, do Resto do mundo (RoW) e dos Estados Unidos (US) (ECOINVENT, 2017).

A base de dados permite apresentar as informações de forma agregada (*system process*) ou unitária (*unit process*), de acordo com a escolha do usuário. É indicado utilizar os dados em processos unitários por serem mais transparentes, adaptáveis e possibilitarem rastrear o processo de maior contribuição (UNEP, 2011).

No entanto, os processos apresentados de forma unitária demandam mais tempo de processamento, tornando a sua utilização mais lenta para apresentação dos resultados em um *software* em comparação ao modo agregado (UNEP, 2011).

No estudo desenvolvido por Monich (2012), foi realizada a ACV pré-operacional de uma edificação em alvenaria convencional e em *light wood framing*. Para o inventário, foi realizada a coleta de dados (fonte primária de dados) e posteriormente comparada ao uso da base de dados Ecoinvent para avaliar as diferenças. Também foram escolhidos diferentes métodos de AICV a fim de comparar a variabilidade dos impactos ambientais.

No uso dos dados primários (por meio da coleta de informações em campo), os valores absolutos de impacto ambiental foram maiores em comparação ao uso da base de dados secundários (informações da base de dados Ecoinvent). No entanto, a diferença encontrada entre os dois sistemas foi a mesma independente da fonte de dados do inventário (MONICH, 2012).

O mesmo aconteceu ao comparar os resultados apresentados por diferentes métodos de AICV, em que a diferença entre a alvenaria e o LWF foi praticamente a mesma, independentemente do método aplicado (MONICH, 2012).

Uma forma de tornar as bases de dados mais consistentes com a realidade local é realizar adaptações, como a troca da matriz energética genérica para a matriz energética do país em estudo, corrigir a quantidade de água utilizada ou ainda pela alteração de modais de transporte. Como resultado, foi comprovada a viabilidade de utilizar dados internacionais adaptados à realidade nacional e mostraram que os impactos diminuíram com essas adaptações (CASTRO et al., 2015; EICKER et al., 2010).

2.3.5 Métodos de AICV

Os métodos utilizam diferentes modelos de caracterização compostos por indicadores (chamados fatores de caracterização) para converter as emissões e recursos consumidos em categorias de impacto.

Os primeiros métodos desenvolvidos foram o EPS (*Environmental Priority Strategies*), Swiss Ecoscarcity (ou Ecopoints) e CML 1992, datados do final da década de 1980 e início de 1990. Com os primeiros usos, verificou-se a necessidade de padronização devido à divergência de resultados, sendo trabalhado inicialmente pela ISSO 14042 (hoje na ISSO 14044) e posteriormente pela UNEP-SETAC (IES, 2010).

Atualmente, existem diversos métodos disponíveis com atualizações periódicas (QUADRO 4), de modo que convém considerar no processo de escolha a consistência

entre o que os processos analisados, os dados de inventário e o método em conjunto com o objetivo e escopo (ABNT, 2009a; IES, 2010).

QUADRO 4 – MÉTODOS DE AICV

Método	Origem
BEES+	Estados Unidos
CML 2002	Holanda
Eco-indicator 99	Holanda
Ecological Scarcity	Suíça
EDIP	Dinamarca
EPS 2000	Suécia
IMPACT 2002+	Suíça
LIME	Japão
LUCAS	Canadá
MEEuP	Holanda
ReCiPe	Holanda
TRACI	Estados Unidos
USEtox	UNEP-SETAC
IMPACT World+	Diversos

FONTE: IES (2010) e MENDES, BUENO E OMETTO (2016).

Os métodos possuem diferentes níveis de aceitação de acordo com o local, área de estudo e abrangência geográfica: os resultados apresentados pelo método MEEuP são válidos para a União Europeia, já o ReCiPe possui categorias de aplicação global e outras para a Europa. Tanto o TRACI e o BEES+ são direcionados à indústria da construção, no entanto o escopo de aplicação é voltado à América do Norte, não sendo encontrado método de abrangência específico para o Brasil ou para a América do Sul (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

Ramos, Santos e Maceno (2019) identificaram que os métodos de AICV mais utilizados em estudos comparativos entre construções convencionais e pré-fabricadas foram o IPCC, IMPACT 2002+ e TRACI, de modo que também foram usados o Eco-indicator 99 e CML baseline.

Atualmente o Eco-indicator 99 não possui mais suporte e é considerado obsoleto, e o método IPCC avalia unicamente o critério de aquecimento global. Os demais métodos possuem as categorias conforme o QUADRO 5.

QUADRO 5 – MÉTODOS DE AICV CONFORME AS CATEGORIAS DE IMPACTO

Categorias	CML baseline	IMPACT 2002+	TRACI 2.1
Acidificação	•	•	•
Aquecimento global	•	•	•
Carcinogênicos		•	•
Depleção abiótica	•		
Depleção da camada de ozônio	•	•	•
Depleção de combustível fóssil			•
Ecotoxicidade	•	•	•
Efeitos respiratórios			•
Energia não-renovável		•	
Eutrofização	•	•	•
Extração mineral		•	
Não-carcinogênicos		•	•
Ocupação de terra		•	
Orgânicos respiratórios		•	
Oxidação fotoquímica	•		
Smog			•
Toxicidade humana	•		

FONTE: A autora (2019).

Com base nesses três métodos foi identificado que as categorias comuns são acidificação, depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade, eutrofização e potencial de aquecimento global, de forma que a seguir são descritos brevemente quanto à sua unidade de medida, causas e consequências.

Acidificação – este fenômeno ambiental atinge o solo e os meios aquáticos e é causado pela queima combustíveis fósseis, pela produção de energia, pela ação de poluentes atmosféricos antropogênicos, principalmente os óxidos de nitrogênio (NO_x) e de enxofre (SO_x) e o amoníaco (NH_3) e o dióxido de carbono (CO_2) que em contato com a água do ar formam ácidos nocivos, dentre outros (DGBN, 2018; KIM e CHAE, 2016; SILVA, 2012).

No caso da acidificação aquática suas consequências levam ao aumento da acidez e da temperatura da água marinha e da água doce, já na acidificação terrestre as propriedades químicas do solo são alteradas pela deposição de nutrientes (AZEVEDO et al., 2013; HANNAN; RUMMER, 2018).

Suas consequências impactam a fauna, a flora, geram o desequilíbrio da cadeia alimentar e do balanço hídrico, degradam construções com a formação de chuva ácida, causam a morte de peixes, redução da fertilidade do solo e o esgotamento de

florestas. Usualmente os impactos dessa categoria são apresentados em kg SO₂ eq. (DGBN, 2018; KIM; CHAE, 2016; SILVA, 2012).

Aquecimento global - é causado pelo acúmulo de gases de efeito estufa como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) advindos de diversas atividades humanas e está diretamente ligado às mudanças climáticas, causando o aquecimento das camadas mais próximas à superfície da Terra (DGBN, 2018; LIRA, 2017). Atividades como desflorestamento e queima de combustíveis fósseis são exemplos que contribuem para a pontuação de aquecimento global (STRANDDORF; HOFFMANN; SCHMIDT, 2005).

Esses gases permanecem na atmosfera por diferentes períodos, devendo o valor de aquecimento global especificar o horizonte de tempo considerado, normalmente de 20, 50 ou 100 anos (DGBN, 2018). É expresso em kg de CO₂ eq. (SILVA, 2012).

Depleção da camada de ozônio - refere-se à sua destruição e a consequente exposição da terra aos raios ultravioleta (UV) provocadas principalmente pelos clorofluorcarbonos (CFCs). A camada de ozônio contribui para barrar a maior parte dos raios UV-A e UV-B e controlar a temperatura na superfície terrestre (DGBN, 2018; LIRA, 2017; SILVA, 2012).

Suas consequências abrangem danos à saúde humana e animal, como formação de tumores, e alterações dos ecossistemas, como modificações na fotossíntese. Os resultados são apresentados em kg CFC⁻¹¹ eq. (DGBN, 2018; LIRA, 2017; SILVA, 2012).

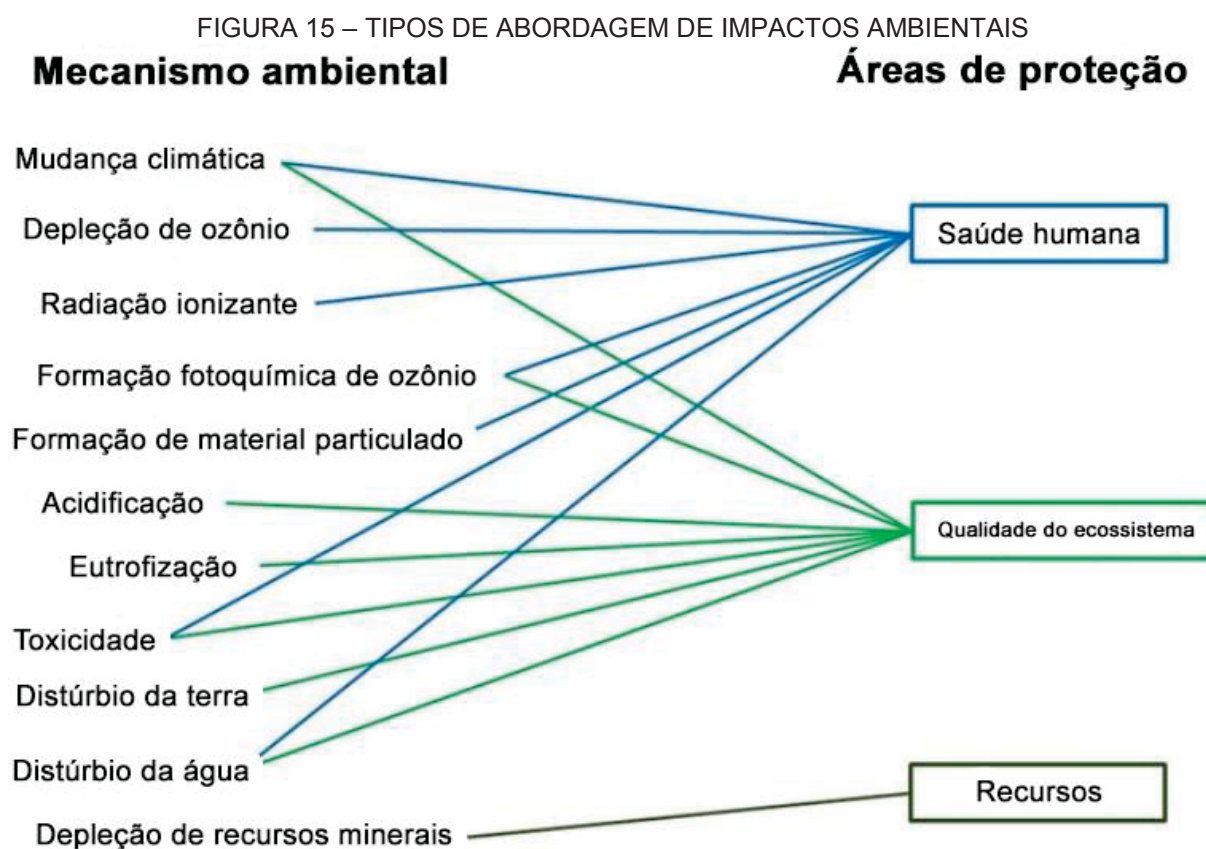
Ecotoxicidade - pode ser referente à água doce, à água marinha ou à terra, e resulta de ações como descarte incorreto de rejeitos, produção madeireira e produção de cerâmica, afetando o ecossistema local ou regional e os organismos vivos (LIRA, 2017; SILVA, 2012; WENZEL, HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Grande parte dos impactos da ecotoxicidade tem como origem o uso de pesticidas e emissão de metais pesados. Características ecotoxicológicas, quanto à sua biodegradação e sua dispersão no meio ambiente são os fatores considerados para avaliar o nível de ecotoxicidade, apresentado em kg TEG water (para a ecotoxicidade aquática) e em kg TEG soil (para a ecotoxicidade terrestre), sendo a TEG a abreviação para trietilenoglicol ou triglicol (LIRA, 2017; SILVA, 2012; WENZEL, HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Eutrofização - comumente estudado avaliado com a acidificação, a eutrofização é a produção excessiva de nutrientes, como o fósforo e o nitrogênio, e que afetam a qualidade da água e do solo e consequentemente o ecossistema. Sua causa também está normalmente associada à ação humana, como a fabricação de materiais de construção. O fator de caracterização podem ser divulgados em kg PO₄ (fosfato) eq., kg N (nitrogênio) eq. ou kg NO₃ (nitrato) eq. (KIM; CHAE, 2016; SILVA, 2012).

Essas categorias quando associadas à ação humana, são causadas por atividades relacionadas à combustão de combustíveis fósseis, à calcinação para produção do zinco primário, extração mineral, desmatamento (IPT, 2018; KIM; CHAE, 2016; PEREIRA, 2004).

As categorias descritas acima são de ponto médio (ou *midpoint* ou mecanismo ambiental) e analisam pontos específicos de impacto. Para uma avaliação menos específica e de fácil compreensão pode ser utilizada a abordagem de danos (*endpoint* ou áreas de proteção) (FIGURA 15).



FONTE: VERONES et al. (2010).

O método IMPACT 2002+ se destaca pela abordagem combinada, em que os danos são uma representação simplificada de uma realidade complexa, indicando os efeitos causados pelo produto ou serviço avaliado segundo a saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos.

O seu desenvolvimento se baseou nos métodos do CML e Eco-indicator 99 e as ponderações para as categorias recebem o mesmo peso, sem priorização de impactos (JOLLIET et al., 2003).

O uso da ACV na construção civil deve abranger diferentes indicadores ambientais de modo a identificar as etapas ou elementos críticos ao longo do ciclo de vida, uma vez que o setor tem papel relevante no consumo energético e de recursos, na geração de resíduos e nas emissões atmosféricas (SOARES; SOUZA; PEREIRA, 2006). Ainda, avaliar apenas uma categoria de impacto pode levar a conclusões equivocadas ou errôneas sobre o perfil ambiental do objeto de análise (KIM; CHAE, 2016).

2.3.6 ACVs na construção civil

Inicialmente foi realizada uma análise bibliométrica da literatura acerca dos estudos comparativos entre a alvenaria convencional e sistemas pré-fabricados com o uso da ACV já realizados.

Foram encontrados 17 artigos publicados entre os anos de 2013 e 2017, encontrados a partir da busca em quatro bases de dados com as palavras-chave *building construction conventional prefabricated "life cycle assessment"* (RAMOS, SANTOS e MACENO, 2019).

Desses, 3 localizados na China (CAO et al., 2015; HONG et al., 2015; LIU et al., 2016), 2 na Itália (GUARDIGLI, 2014; TAKANO e PITTAU, 2013), 1 na Alemanha (TAKANO e PITTAU, 2013), 3 na Malásia (BIN MARSONO e BALASBANEH, 2015; OMAR et al., 2014; WEN, SIONG e NOOR, 2015), 1 na Polônia (PAJCHROWSKI et al., 2014), 1 em Hong Kong (DONG et al., 2015), 1 em Luxemburgo (IRIBARREN et al., 2015), 1 na Sérvia (MAODUS et al., 2016), 1 no Brasil (CALDAS et al., 2017), 1 na Lituânia (MOTUZIENĖ et al., 2016) e 1 em Taiwan (CHOU e YEH, 2015).

Todos os estudos realizaram a análise pré-operacional dos impactos ambientais advindos da construção de edificação, 53% a operação e 41% a pós-operação. Quanto ao *software* mais utilizado, o SimaPro esteve presente em quase

um terço das pesquisas, já a base de dados foi a Ecoinvent e os métodos IMPACT 2002+ e TRACI.

De modo geral, os impactos ambientais causados por sistemas pré-fabricados apresentaram melhores resultados em comparação ao sistema convencional do local de estudo, em que as categorias mais avaliadas foram: gases de efeito estufa, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos, estas três últimas como categorias de impacto *endpoint*.

Cabe ressaltar que ao realizar o levantamento das características e composições dos sistemas considerados como convencionais nos estudos, verificou-se a grande variabilidade de materiais utilizados e do que é de uso convencional para cada país. Dessa forma, foi realizado outro levantamento com o objetivo de identificar somente estudos nacionais de ACV, não necessariamente comparativos, para avaliação dos resultados encontrados.

Foram encontrados 8 estudos nacionais de ACV voltados à avaliação de sistemas construtivos em alvenaria convencional, LWF e LSF baseados no método de ACV, com base na combinação das palavras “avaliação do ciclo de vida alvenaria convencional wood steel frame framing” em um portal indexador de artigos (CALDAS, 2016; CALDAS et al., 2017; MASS, 2017; MONICH, 2012; NETO, 2011; PALACIO, 2013; PEDROSO, 2015; TAVARES, 2006), sendo que o estudo de Caldas et al. (2017) já havia sido filtrado pela análise bibliométrica.

Tavares (2006), em seu projeto de pesquisa de tese, desenvolveu uma metodologia para calcular os consumos energéticos e as respectivas emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida de cinco edificações residenciais.

Na etapa pré-operacional, considerou a energia incorporada (EI) dos materiais de construção, desperdícios, consumo de energia na obra e transporte (dos materiais, dos trabalhadores na obra e dos desperdícios). Na operacional, a reposição de materiais, consumo de energia no uso da edificação e energia de cocção. Na pós-operacional, a energia para demolição, remoção de resíduos e transporte dos resíduos (TAVARES, 2006).

Concluiu que, para os casos estudados, a EI contribuiu entre 29,27% e 48,76% do total de energia, a energia operacional entre 48,50% e 68,71% e a energia pós-operacional entre 1,85% e 2,75% (TAVARES, 2006).

Na maioria dos modelos de habitação, as emissões de CO₂ foram superiores para a energia embutida, correspondendo a até quase duas vezes às emissões de na

operação. Quanto à pós-operação, a sua contribuição foi em média de 3% em relação ao total de emissões ao longo do ciclo de vida (TAVARES, 2006).

Os materiais que mais consumiram energia na pré-operação foram a cerâmica vermelha, o cimento e o aço. Em relação às emissões de CO₂, os maiores responsáveis são o cimento, cerâmica vermelha e tintas (TAVARES, 2006).

Neto (2011) realizou um estudo de ACV comparativa de uma fachada em LSF e a mesma em AC quanto à sua construção. Foram considerados para levantamento: a extração das matérias-primas, manufatura dos materiais e seu transporte. Foram utilizados dados secundários extraídos da literatura para identificar os valores de EI e emissões de CO₂.

O autor cita a relação direta entre a robustez dos perfis em LSF e os impactos de EI e emissões de CO₂, em que quanto mais robustos os elementos, maior a sua contribuição na EI total e emissão de CO₂ total do sistema e consequentemente mais próximos dos valores encontrados para a fachada em alvenaria (NETO, 2011).

Dessa forma, o resultado de EI total atribuída ao LSF foi de 461 a 1527 MJ/m², que variou conforme a utilização de perfis mais esbeltos ou mais robustos. Já a emissão de CO₂ variou de 1,0 a 2,4 kg CO₂/m², nas mesmas condições. Para a alvenaria, os valores foram de 27 MJ/m² e 2,5 kg CO₂/m² para a EI e emissão de CO₂ (NETO, 2011).

Monich (2012) levantou, em sua pesquisa dissertação, os valores de energia e carbono embutidos na fabricação de uma HIS pré-fabricada em LWF na cidade de Curitiba (PR) e comparou aos valores encontrados na simulação da mesma construção em alvenaria convencional. Foram considerados para o estudo apenas as contribuições dos materiais utilizados na construção da habitação nos dois tipos de sistemas construtivos.

As quantidades dos materiais foram fornecidas pela empresa responsável pelo projeto utilizado como estudo de caso e que fabrica habitações em LWF. Já o quantitativo em alvenaria convencional foi estimado (MONICH, 2012).

O LWF correspondeu a 96% do total de energia embutida caso fosse em alvenaria. Já o carbono embutido foi quase 2,5 vezes menor em relação à habitação convencional. Os materiais responsáveis pelos maiores valores de energia embutida e de emissões de CO₂ foram o aço, a telha cerâmica e o concreto (MONICH, 2012).

Palacio (2013) avaliou os sistemas de LSF e AC aplicados à vedação de uma HIS com base na EI na fase pré-operacional e no desempenho térmico, considerando

a extração de matérias-primas, fabricação de materiais e transporte até a obra). Para a habitação em LSF foram criadas cinco combinações diferentes de revestimento interno e de isolante térmico, e para todos os modelos foi considerado o revestimento externo em *siding vinílico* e placa cimentícia.

Considerando todos os modelos, a massa total da construção em LSF foi em geral 60% menor que em AC, no entanto os valores de EI foram 30% maior à AC. Sobre o desempenho térmico, apenas a simulação com o revestimento interno em chapa de gesso e isolamento térmico de EPS obteve resultado satisfatório (PALACIO, 2013).

Pedroso (2015) estudou a ACV energética durante as três fases do ciclo de vida para vedações de habitações em painel de concreto moldado *in loco*, alvenaria estrutural de blocos de concreto, LSF e AC.

Considerou-se as etapas de extração de matérias-primas, fabricação de materiais, execução ou montagem, uso e manutenção da construção, desconstrução e disposição final, incluindo os transportes.

Com relação aos resultados apresentados para LSF e AC, foco do presente trabalho, verificou-se que o LSF obteve maiores índices de EI 93% no pré-uso, 2% maior no uso e manutenção e 69% menor na desconstrução em relação à AC. Em relação à EI total, o LSF apresentou a percentagem de 15% maior que a AC.

No estudo de Caldas (2016), foram comparados dois sistemas de vedação vertical, em LSF e a convencional em tijolos cerâmicos em termos energéticos e de emissões de CO₂ para uma habitação unifamiliar localizada em Brasília (DF), ao longo de todo o seu ciclo de vida. As etapas consideradas foram as mesmas que em Tavares (2006).

O autor identificou que a estrutura e a vedação possuem as maiores massas, energias incorporadas e emissões de CO₂ para os dois tipos de vedações estudadas, no entanto a participação desses componentes foi maior na alvenaria convencional (CALDAS, 2016).

Entre os dois sistemas, as emissões de CO₂ e consumo energético foram em média 40% mais baixos no LSF, sendo a etapa operacional a mais relevante em ambas as vedações (CALDAS, 2016).

O consumo total médio de energia para LSF foi de 30,26 GJ/m² e para alvenaria convencional de 30,36 GJ/m². Para as emissões de CO₂ totais médias, a vedação em LSF emitiu 1,52 t CO₂/m² e a convencional 1,56 t CO₂/m² (CALDAS, 2016).

Verificou-se que o consumo energético da vedação convencional variou de 1% a 2% acima do encontrado para a vedação em LSF. Quanto ao CO₂, essa variação foi de 1% até 7% superior ao do LSF (CALDAS, 2016).

Caldas et al. (2017) compararam as emissões de CO₂ para os sistemas de alvenaria de blocos cerâmicos e de LSF aplicados a uma habitação social localizada em Brasília (DF), considerando o sistema do berço ao túmulo. As partes da construção consideradas na ACV foram: estrutura e vedação, pintura, instalações, telhado, piso e portas e janelas.

Na fase pré-operacional foi considerado a extração e processamento da matéria-prima, o transporte e os resíduos gerados na construção. Na fase operacional considerou-se as emissões de CO₂ geradas por equipamento que utilizam energia elétrica e para a atividade de cocção. Na pós-operação foram contabilizadas as emissões para a atividade de demolição ou desconstrução e de disposição final (CALDAS et al., 2017).

Em relação à construção, os impactos foram superiores para a alvenaria e para os dois sistemas a maior parte das emissões foi proveniente da estrutura e vedação.

Já durante a operação da edificação, a alvenaria teve melhor desempenho devido à maior capacidade térmica. Na manutenção, a pintura foi o componente responsável pelas maiores emissões em ambos os sistemas, sendo superior na alvenaria. Considerando as emissões totais para a manutenção, o LSF gerou maiores impactos. Essa etapa foi responsável por 50% a 70% das emissões totais do ciclo de vida (CALDAS et al., 2017).

Quanto à pós-operação, os resultados refletiram a maior quantidade em massa a ser demolida na alvenaria e o seu processo de desconstrução, assim como a maior quantidade disposta em aterro. Isso acabou gerando as maiores emissões de CO₂ por parte da alvenaria, no entanto esta última etapa foi responsável por menos de 1% das emissões totais (CALDAS et al., 2017).

A fase operacional foi a mais relevantes dentre as três analisadas, seguido pela fase pré-operacional e pós-operacional, concluindo que o sistema em LSF não é recomendado para utilização em construções equivalentes ao estudo de caso (CALDAS et al., 2017).

Mass (2017) avaliou a geração de resíduos, a energia embutida e as emissões de CO₂ para a construção em LSF de uma habitação de pequeno porte localizada em Ponta Grossa (PR) e simulou a mesma construção em alvenaria convencional.

A quantidade total adquirida para a construção em LSF correspondeu a aproximadamente um terço da quantidade em alvenaria convencional, e a quantidade de resíduos gerada na construção em LSF foi de aproximadamente 13%, enquanto na convencional de 32% (MASS, 2017).

Quanto à energia embutida, a residência construída em LSF consumiu 11,23 GJ e a alvenaria 65,66 GJ, o que corresponde a quase seis vezes mais que a primeira. Em relação às emissões de CO₂, o LSF foi responsável por gera 0,89 t, enquanto a alvenaria convencional 6,29 t, em torno de sete vezes mais (MASS, 2017).

Todos os estudos apresentados se basearam nos dados apresentados por Tavares (2006), assim como em sua metodologia de ACV desenvolvida. Além disso, Monich (2012) comparou os resultados utilizando o método de Tavares (2006) e a aplicação da base de dados Ecoinvent e apresentou que apesar de valores absolutos diferentes, em termos relativos os resultados foram equivalentes e chegaram às mesmas conclusões.

Os resultados das pesquisas apresentadas demonstraram que a alvenaria convencional gerou mais impactos ambientais de acordo com os indicadores analisados, assim como consumiu mais energia, independente de qual etapa do ciclo de vida analisada.

3 MÉTODO DE PESQUISA

O conhecimento científico diferencia-se de outros tipos de conhecimento (ex. filosófico, popular e religioso) por exigir um conjunto de ações e observações planejadas, rigorosas, sistemáticas e críticas, com o objetivo de gerar explicações cada vez mais completas, à medida que se verificam conexões entre eventos e são estabelecidas generalizações (FILHO, 1998; MARCONI; LAKATOS, 2010).

No entanto, a flexibilidade também é uma característica do planejamento da pesquisa, devendo o foco estar no alcance dos objetivos e não no atendimento às normas, existindo apenas critérios orientadores para facilitar a investigação, podendo ser adaptado de acordo com a necessidade (BEAUD, 2002; KOCHÉ, 2002).

Nesse contexto, este capítulo apresenta a classificação da pesquisa, a descrição do estudo de caso e o protocolo utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

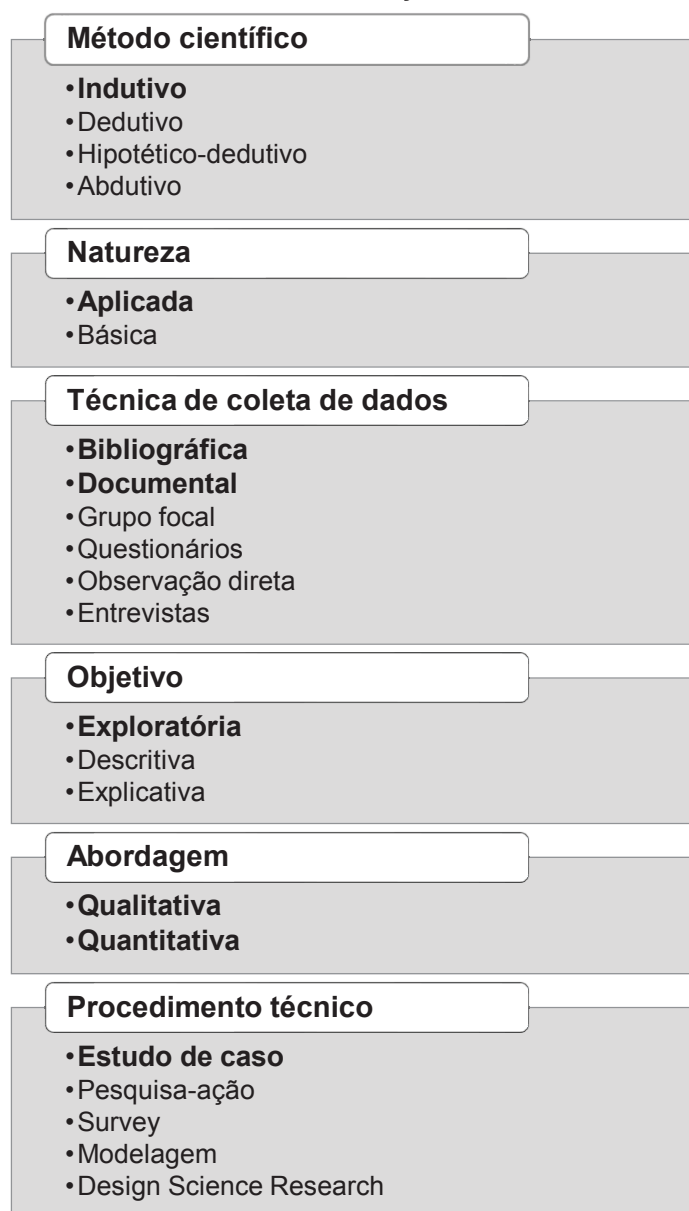
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Com base nas classificações apresentadas por Gil (2009) e Marconi e Lakatos (2010), a presente pesquisa foi definida segundo o método científico, natureza, técnicas de coleta e análise de dados, objetivo, abordagem e procedimento técnico (FIGURA 16).

O método científico classifica-se como indutivo por reunir informações isoladas da literatura e orientá-las de modo a identificar os impactos ambientais provenientes dos sistemas construtivos avaliados, possibilitando inferir afirmações acerca dos desempenhos ambientais apresentados (MARCONI; LAKATOS, 2010). A própria ACV pode ser classificada como um método indutivo, já que se baseia em dados originados de observações, relaciona-as conforme a unidade de análise e apresenta os resultados.

A natureza da pesquisa é aplicada por gerar conhecimentos práticos e apresentar resultados úteis à solução de problemas bem definidos (SILVA e MENEZES, 2001). Possibilita auxiliar profissionais em tomadas de decisão, aperfeiçoar processos, além de contribuir com a literatura nacional de ACV na construção civil, ainda em crescimento.

FIGURA 16 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA



FONTE: Elaborada pela autora baseado em GIL (2009) e DRESCH, LACERDA e JÚNIOR (2015).

A técnica de coleta de dados se utilizou do levantamento bibliográfico e documental, que inclui normas, artigos, livros, dissertações, teses e informações técnicas. Com base nesses materiais coletados é que foram realizados os levantamentos quantitativos de materiais e desenvolvidas as ACVs.

Quanto ao objetivo, define-se o estudo como exploratório por apresentar novas informações e gerar conclusões a partir de diferentes fontes de dados. Apesar de terem sido identificados estudos nacionais que comparam o sistema construtivo convencional a um inovador, verificou-se uma lacuna na avaliação conjunta da alvenaria convencional, do LWF e do LSF como sistemas construtivos. O presente

trabalho pretende gerar conclusões mais assertivas ao tratar dos três processos para uma mesma construção, com critérios idênticos que permitam a comparação entre eles.

Quanto à abordagem da pesquisa, classifica-se como quantitativa e qualitativa por apresentar e os resultados de forma mensurável e todo o processo de desenvolvimento da ACV representados, atendendo aos objetivos predefinidos em 1.1 (SILVEIRA; GERHARDT, 2009).

Por fim, o procedimento técnico ou estratégia de pesquisa adotado é o estudo de caso, em que este tipo de estudo foi escolhido por aprofundar os conhecimentos de uma situação individual, uma típica HIS como unidade de análise e os impactos ambientais gerados ao longo do seu ciclo de vida.

Ao longo do trabalho foram utilizadas diferentes fontes de evidência para validar as informações utilizadas tanto no pré-dimensionamento das construções como no desenvolvimento das ACVs.

Além disso, caracteriza-se por questionar “como” ou “por que” diante de fatos que não são controlados pelo pesquisador, de modo a estudar fenômenos pouco explorados (YIN, 2001), uma vez que não foram encontrados estudos que analisaram esses três sistemas construtivos simultaneamente, permitindo a sua comparação.

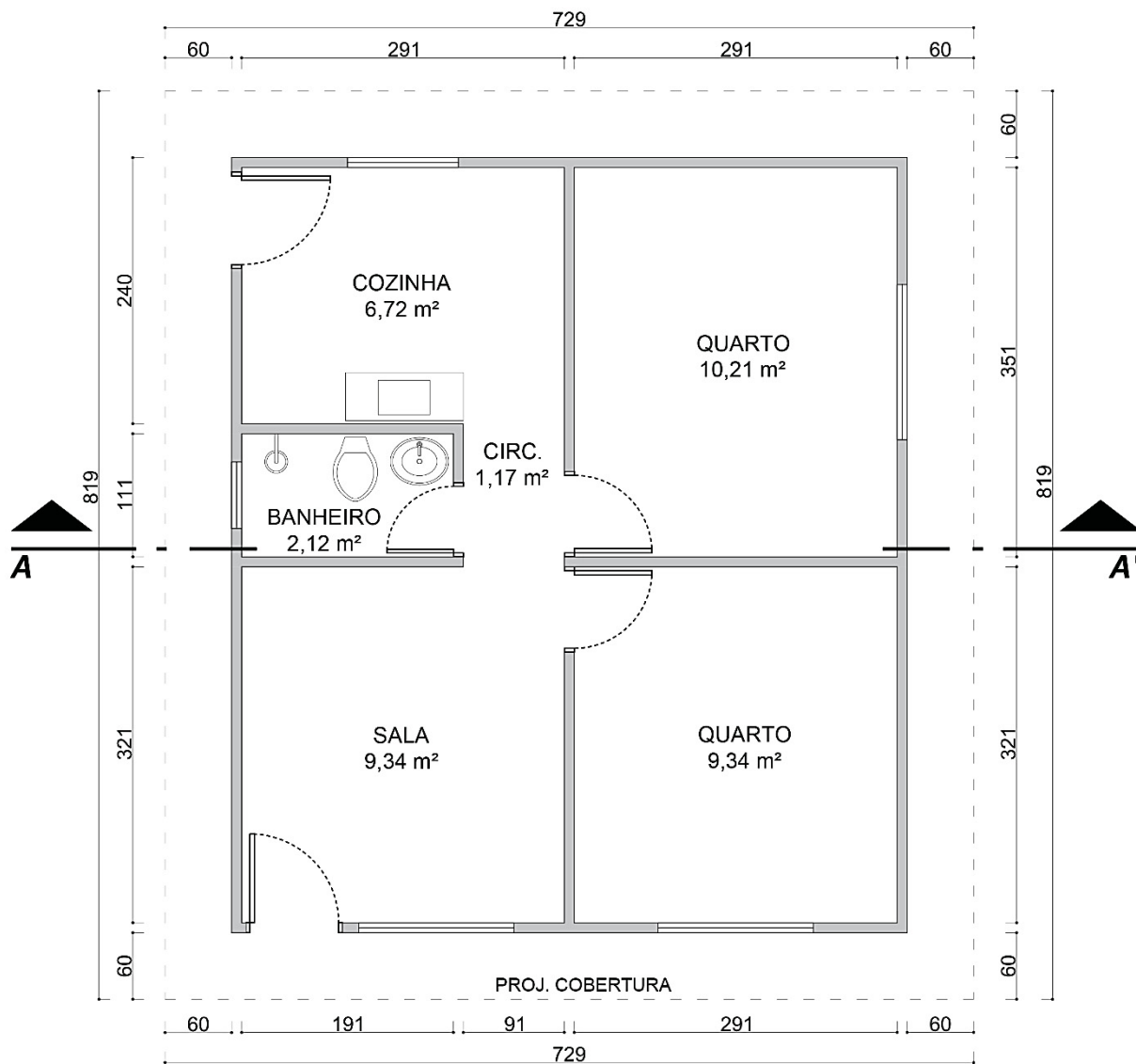
O fato de a pesquisa ser classificada como estudo de caso possibilitou a flexibilidade na elaboração das etapas realizadas. Com os resultados de um estudo de caso em mãos, podem-se gerar conclusões a serem confrontadas em futuros estudos, “...encontrar resultados semelhantes nas diversas unidades investigadas” (ALVES-MAZZOTTI, 2006, p. 646) ou “... a partir de um conjunto particular de resultados, ele (o pesquisador) pode gerar proposições teóricas que seriam aplicáveis a outros contextos” (ALVES-MAZZOTTI, 2006, p. 646), chamada de generalização analítica (YIN, 2001).

3.2 ESTUDO DE CASO

O presente trabalho baseou-se no projeto arquitetônico padrão de uma habitação popular desenvolvido pela Caixa Econômica Federal (CEF, 2007), com o objetivo de estudar o comportamento de uma construção tradicional para a realidade brasileira (FIGURA 17). Demais detalhes do projeto arquitetônico do estudo de caso estão disponíveis no APÊNDICE A.

Para avaliação dos impactos ambientais durante o ciclo da edificação foram considerados os seguintes sistemas construtivos: alvenaria com blocos cerâmicos (AC), LWF e LSF.

FIGURA 17 – MODELO DE HABITAÇÃO POPULAR



FONTE: CEF (2007).

Para o estudo comparativo foram selecionadas as partes da edificação abrangendo subestrutura, superestrutura, vedações e cobertura, com a descrição conforme o QUADRO 6.

QUADRO 6 – DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS CONFORME O SISTEMA CONSTRUTIVO

	AC	LWF	LSF
Fundação	Estacas Ø 20 cm, H= 2,5m com concreto Fck 25 MPa Camada de brita (E = 3 cm) Lastro de concreto (E = 5 cm) Vigas baldrame (14 cm x 20 cm) - 4 Ø 8 mm Impermeabilizante asfáltico	Camada de brita (E = 5 cm) Radier (E = 10 cm) com concreto Fck 25 MPa Tela soldada Ø4,2 mm Lona plástica Impermeabilizante asfáltico	Camada de brita (E = 5 cm) Radier (E = 10 cm) com concreto Fck 25 MPa Tela soldada Ø4,2 mm Lona plástica Impermeabilizante asfáltico
Estrutura	Pilares (14 cm x 26 cm) - 4 Ø 10 mm Vigas (14 cm x 25 cm) - 2 Ø 10 mm e 2 Ø 8 mm Laje pré-moldada com lajota e concreto	OSB Perfil de madeira maciça: Montante (0,038 m x 0,09 m), espaçamento máximo 60 cm Soleira dupla (0,076 m x 0,09 m) Vigas na laje (0,038 m x 0,11 m), espaçamento máximo 60 cm	OSB Perfil de aço zincado: Montante Ue (90 mm x 40 mm x 0,95 mm - 0,012 mm) Guia U (90 mm x 40 mm, E = 0,95 mm), espaçamento máximo 60 cm Vigas na laje U (140 mm x 40 mm, E = 0,95 mm), Ue (90 mm x 40 mm x 12 mm, E = 0,95 mm), espaçamento máximo 49 cm
Parede/ vedação	Alvenaria cerâmica (9 cm x 19 cm x 19 cm) Argamassa para assentamento Chapisco Emboço	Lã de vidro OSB em ambas as faces Membrana hidrófuga Placa de gesso na face interna Massa para drywall na face interna Placa cimentícia na face externa Massa cola para placa cimentícia e tela fibra de vidro na face externa	Lã de vidro OSB em ambas as faces Membrana hidrófuga Placa de gesso na face interna Massa para drywall na face interna Siding vinílico na face externa
Ver-ga	2 Ø 6,3 mm Concreto Argamassa	Perfil de madeira maciça Ue (0,038 m x 0,09 m) (0,09 m x 0,09 m)	Perfil de madeira maciça 2Ue (90 mm x 40 mm x 12 mm, E = 0,95 mm)
Reves-timento	Chapisco Emboço Contrapiso	Argamassa drywall Tela de fibra de vidro Massa para placa cimentícia Contrapiso	Argamassa drywall Tela de fibra de vidro Siding vinílico Contrapiso
Laje	Vigotas treliçadas Lajotas cerâmicas Capa de concreto (E = 4 cm)	Perfil de madeira maciça (0,045 m x 0,19 m) OSB	Perfil de aço zincado (90 mm x 40 mm x 0,95 mm - 0,012 mm) OSB
Co-ber-tura	Estrutura de madeira Telha cerâmica	Estrutura de madeira Telha cerâmica	Estrutura de aço zincado Telha de fibrocimento

FONTE: A autora (2019).

A seleção dos materiais considerados para o sistema construtivo em AC se baseou na composição convencionalmente aplicada nas construções atuais. Para o sistema em LWF e em LSF levou-se em consideração a composição de materiais para uma habitação unifamiliar conforme apresentado nos respectivos DATecs (BRASIL, 2016b, 2018b).

O local considerado para a construção da edificação foi o Centro de Estudos de Engenharia Civil (CESEC), localizado no campus Politécnico da UFPR, na cidade de Curitiba (PR).

3.3 PROTOCOLO DE ESTUDO DE CASO

Segundo Yin (2001), recomenda-se criar um protocolo para o estudo de caso, que auxilia na antecipação e resolução de possíveis problemas que podem ocorrer ao longo da pesquisa e evita desvios do tema em estudo, além de ser um instrumento para aumentar a sua confiabilidade e guiar o pesquisador.

As principais etapas deste trabalho são Revisão da literatura, Pré-dimensionamento estrutural e levantamento quantitativo de materiais, Desenvolvimento da ACV e Resultados e análises e Considerações finais, detalhadas seguir.

3.3.1 Revisão da literatura

Para desenvolver uma pesquisa científica é essencial que os descobrimentos empíricos sejam interpretados através do embasamento na bibliografia existente (MARCONI; LAKATOS, 2010). Essa busca teórica acerca dos assuntos relacionados ao tema em estudo se utiliza de artigos de periódicos ou congressos, dissertações, teses, publicações na internet, livros, e sempre que possível com o cruzamento de informações de modo a aumentar a confiabilidade das afirmações (GIL, 2009).

A sua importância está no agrupamento de informações dispersas e que poderia vir a ser inviável coletá-las diretamente, na definição da situação atual do problema de pesquisa e na apresentação de estudos similares (GIL, 2009; SILVA; MENEZES, 2001).

Inicialmente foi realizada uma busca na literatura científica para identificar possíveis lacunas para pesquisa na área de avaliação de impactos ambientais na

construção civil no Brasil em se tratando de sistemas construtivos. Após a definição do tema, iniciou-se a elaboração do capítulo inicial da presente dissertação, que corresponde à primeira etapa do protocolo do projeto de estudo de caso.

Na sequência, foi criado um capítulo dedicado à revisão da literatura que contém: o histórico e conceitos relacionados aos sistemas construtivos, separando-os em convencional (AC) e pré-fabricados inovadores (LSF e LWF). Foi realizada a contextualização histórica, a descrição do funcionamento dos sistemas e as nomenclaturas usadas para cada um deles.

Em seguida foi apresentada a ferramenta ACV, com a contextualização histórica, limitações em seu uso, estrutura para o seu desenvolvimento, base de dados, métodos e ACVs realizadas no Brasil na área da construção. O tópico sobre as bases de dados apresentou os critérios que definiram a escolha pelo Ecoinvent e a possibilidade de adaptação de dados genéricos da base com o objetivo de aproximá-los à realidade local a ser trabalhada. Castro et al. (2015) e Eicker et al. (2010) realizaram alterações na base de dados e citaram a alteração da matriz energética como um dos principais pontos para a transferência de dados genéricos do inventário para o contexto nacional.

Com relação ao método de AICV, baseou-se nos resultados da revisão sistemática realizada por Ramos, Santos e Maceno (2019) que apresentaram os métodos IMPACT 2002+, TRACI 2.1 e CML baseline como os mais utilizados na área da construção civil.

As categorias de impacto avaliadas foram escolhidas com base nos impactos comuns avaliados pelos três métodos de AICV: Acidificação (aquática e terrestre), Depleção da camada de ozônio, Ecotoxicidade (aquática e terrestre), Eutrofização e Aquecimento global.

Foi então escolhido o método IMPACT 2002+ para avaliação dos resultados do presente trabalho, por ser o único a apresentar os resultados segundo o critério de pontuação única, necessário para realizar as adaptações na base de dados

Além disso, foi consultada a norma ISO 14049/TR (2012) para definir o critério de exclusão de processos na realização das adaptações da matriz energética. Verificou-se que convencionalmente é utilizado o critério de corte de 5% para excluir processos que contribuem menos de 5% do total da massa, energia ou relevância ambiental total.

Portanto a estratégia para adaptar a base de dados de modo a aproximar os resultados à realidade brasileira consistiu na alteração da matriz de eletricidade para a realidade brasileira desconsiderando os processos 5% menos relevantes com base no critério ambiental de pontuação única do método IMPACT 2002+.

A pontuação é gerada a partir de pesos atribuídos a cada categoria, que ao final apresenta a contribuição de cada processo em relação à carga ambiental total (PRÉ, 2016). No caso do IMPACT 2002+ o peso para todas as categorias é 1, portanto é considerada a mesma relevância para todos os impactos.

3.3.2 Pré-dimensionamento estrutural e levantamento quantitativo de materiais

O processo de pré-dimensionamento das estruturas em AC, LWF e LSF foi realizado com o auxílio de profissionais especialistas em cada tipo construtivo e da bibliografia técnica. Os três sistemas construtivos atendem às normas específicas: ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto — Procedimento), ABNT NBR 7190:1997 (Projeto de estruturas de madeira) verificadas para estabilidade e segurança, ABNT NBR 14762:2010 (Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio), ABNT NBR 15253:2014 (Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações — Requisitos gerais).

O sistema LSF também se baseou ainda na literatura técnica “Tabelas de dimensionamento estrutural para edificações com o sistema construtivo em *steel framing*” de Rodrigues (2010) e “Steel Framing: Engenharia” de Rodrigues e Caldas (2016).

O levantamento de quantidades de materiais para as habitações em AC, LWF e LSF se baseou no quantitativo fornecido pela CEF para a habitação padrão em alvenaria com blocos de concreto (CEF, 2007) e adaptado para os sistemas construtivos. Foram utilizadas as tabelas SINAPI e Tabela de Composições e Preços para Orçamentos (TCPO) 2013, além dos índices de perdas e massas específicas apresentados no ANEXO A.

3.3.3 Desenvolvimento da ACV

O desenvolvimento da ACV seguiu a estrutura apresentada nas normas ABNT NBR 14040 (2009a) e 14044 (2009b). Foi utilizado o *software* SimaPro 8.5.2.0, a base de dados Ecoinvent 3.4 e o método IMPACT 2002+.

A ACV considerou os materiais de construção utilizados para a fabricação das habitações, as reposições de materiais durante a sua vida útil e a destinação final dos resíduos gerados pela demolição da residência. Portanto o ciclo de vida da construção abrangeu as três fases: pré-operação, operação e pós-operação (do berço ao túmulo).

A pré-operação se refere ao período em que a edificação é construída, que se inicia com o processo de extração das matérias-primas, manufatura dos materiais até o processo de finalização da construção. Essa primeira fase normalmente utiliza dados secundários devido à quantidade e complexidade das informações necessárias.

A segunda fase considera substituições necessárias de materiais durante o uso da construção. Os elementos que a compõem devem atender às necessidades dos seus usuários de acordo com os critérios definidos pela ABNT NBR 15575 (2013), sendo uma delas apresentar durabilidade compatível com a vida útil de projeto (VUP), que é a estimativa teórica de tempo que o sistema deve atender com desempenho satisfatório esperado durante o seu uso (ABNT, 2013).

Para garantir a durabilidade e consequentemente a VUP dos materiais utilizados na construção, é necessário identificar seu fator de reposição, que é a frequência necessária de trocas do material ao longo do uso da edificação.

O FR é calculado conforme a equação (1), dividindo-se a vida útil da construção pela VUP do material menos 1. Considerou-se uma vida útil de 50 anos para a HIS adotada neste trabalho, período de tempo normalmente utilizado em estudos similares já desenvolvidos (CALDAS, 2016; OBA, 2014; TAVARES, 2006).

$$\text{Fator de reposição (FR)} = \frac{\text{Vida útil da construção}}{\text{VUP do material}} - 1 \quad (1)$$

Para identificar a quantidade de material para reposição durante a fase operacional é multiplicada a quantidade do item utilizada no sistema pelo fator de reposição (FR). Este trabalho considerou a VUP mínima dos sistemas de uma

construção conforme a ABNT NBR 15575 (2013). No QUADRO 7 são apresentados os FR considerados na reposição de materiais na operação.

QUADRO 7 – VUP MÍNIMA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Sistema	VUP MÍNIMA - ABNT NBR 15575 (2013)	Fator de reposição
Cobertura	20 anos	1,50
Estrutura	50 anos	0,00
Vedação vertical externa	40 anos	0,25
Vedação vertical interna	20 anos	1,50

FONTE: A autora (2019).

Foi adotada essa estratégia de adoção da mesma VUP mínima para os três sistemas construtivos por não haver consenso sobre a forma de considerar a reposição de materiais ao longo do ciclo de vida e para não criar vieses de forma a beneficiar algum deles em relação ao demais.

Além do consumo de materiais para reposição, o uso de uma construção consome energia, que varia de acordo com a fonte energética, o perfil do usuário, a tipologia da construção e o equipamento usado. Essa variável foi desconsiderada do presente estudo por adotar a premissa de que consumo é o mesmo para os três tipos de sistemas construtivos, não influenciando na comparação entre eles.

A fase pós-operacional considerou a destinação final dos resíduos gerados pela demolição da habitação, baseado no critério adotado por Evangelista et al. (2018), que definiu a quantidade em massa encaminhada a cada destino. Para definir o encaminhamento correto dos resíduos seguiu-se a resolução Nº 307 de 2002 do CONAMA (BRASIL, 2002) que dispõe de informações sobre a gestão dos resíduos da construção civil.

O QUADRO 8 apresenta o aterro de inertes, o aterro sanitário, o aterro de resíduos perigosos e a reciclagem como possíveis destinos para os resíduos da construção civil, com base na sua classificação, tipo e característica.

O aterro de inertes caracteriza-se por receber materiais da classe A com o objetivo de reservá-los para uso futuro ou possibilitar que a área receba função diversa futuramente (ABNT, 2004a). O aterro sanitário caracteriza-se pela disposição dos resíduos no solo impermeabilizado, o quais devem ser compactados e cobertos por terra a fim de minimizar odores (BORGES, 1999). O aterro de resíduos perigosos

recebe materiais inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos (ABNT, 2004b), que possui rígidos critérios de segurança para a sua operação (ABNT, 1987).

QUADRO 8 – DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

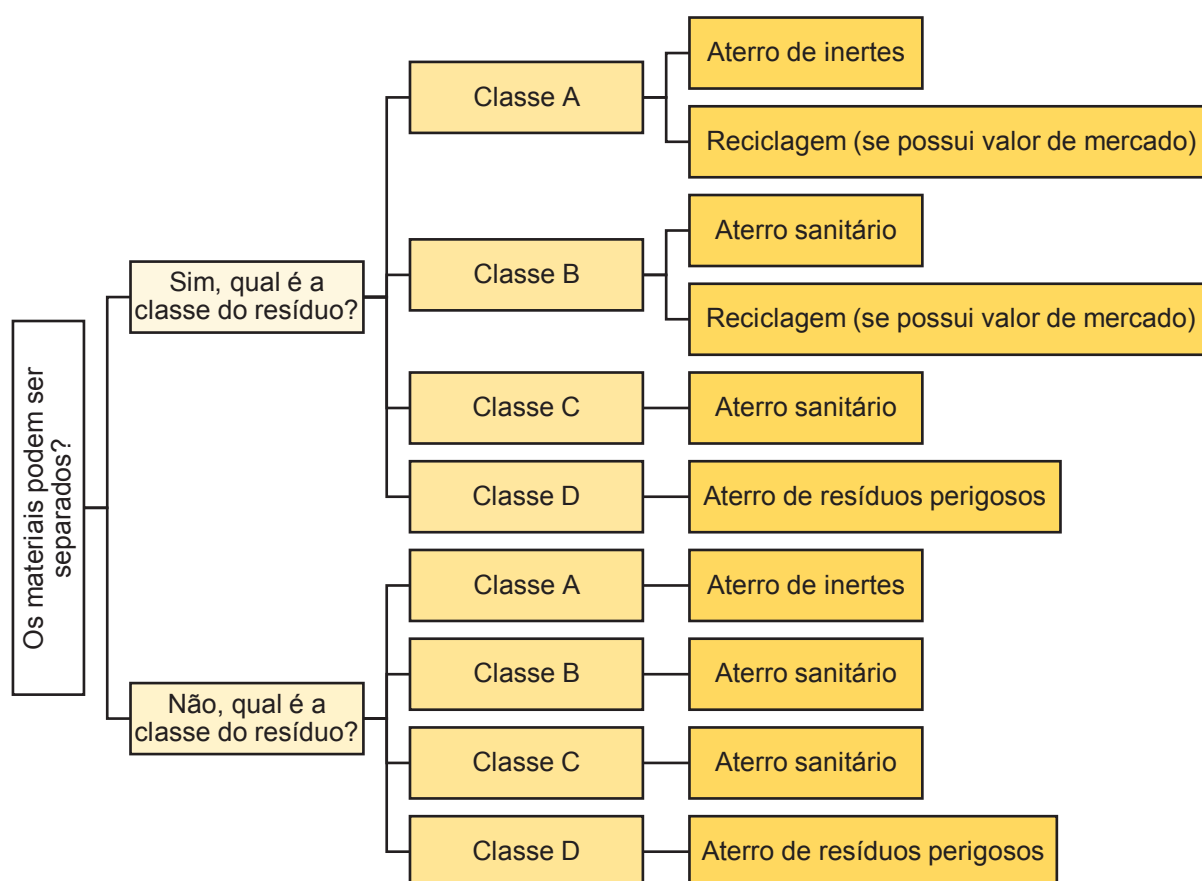
Classe	Origem ou tipo do resíduo	Característica do resíduo	Destino final
A	- Obra de infraestrutura - Terraplenagem - Cerâmicos - Argamassas - Concreto	Reutilizável ou reciclável como agregado	- Aterro de inertes - Reutilização - Reciclagem
B	- Plásticos - Papel, papelão - Metais - Madeiras - Gesso - Outros	Reutilizável ou reciclável para outro destino	- Aterro sanitário - Reutilização - Reciclagem
C	- Lã mineral - Outros	Economicamente inviável para reciclagem ou recuperação	- Aterro sanitário
D	- Tintas - Solventes - Óleos - Outros	Contaminado ou prejudicial à saúde	- Aterro de resíduos perigosos

FONTE: BRASIL (2002) e ABRECON (2017).

Já a definição dos materiais recicláveis considerou aqueles que puderam ser desmontados ou separados dos demais sem a sua contaminação, baseado no critério adotado por Dreher (2013), e que possuem valor de mercado para viabilizar a separação (CARAFÉR METAIS, 2019; INSTITUTO GEA, 2019).

Por exemplo, o aço utilizado no sistema construtivo em AC está completamente envolvido no concreto, de modo que a sua separação é trabalhosa, custosa e demanda considerável tempo de trabalho, diferentemente do aço utilizado no LSF em que todas as ligações são parafusadas e o processo de desmontagem é simples e rápido, além de possuir valor de mercado. Portanto o aço utilizado no sistema AC foi destinado ao aterro sanitário e o aço do LSF para a reciclagem.

FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DE DESTINO FINAL DOS MATERIAIS



FONTE: A autora (2019).

A FIGURA 18 apresenta o fluxograma da destinação dos materiais de acordo com a classificação do material conforme a resolução do CONAMA (BRASIL, 2002) e a possibilidade de desmontagem no processo de desconstrução.

3.3.4 Resultados, análises e considerações finais

A última etapa é a apresentação dos resultados da ACV para as habitações nos sistemas construtivos avaliados e o comparativo de impactos ambientais para os três sistemas construtivos. Optou-se por avaliar com maior profundidade a fase construtiva baseado na pesquisa de Evangelista et al. (2018), que verificou o impacto dos materiais utilizados no processo construtivo e segmentou a construção em etapas para levantar quais elementos da construção são mais relevantes em termos de impactos ambientais.

Nas considerações finais é realizada uma revisão crítica do escopo da ACV, do inventário e dos resultados, para que os objetivos da ACV definidos inicialmente

fossem atendidos. Em relação à dissertação, também foram verificados o atendimento ao problema de pesquisa, aos pressupostos, aos objetivos do estudo e finalmente são feitas sugestões para futuras pesquisas.

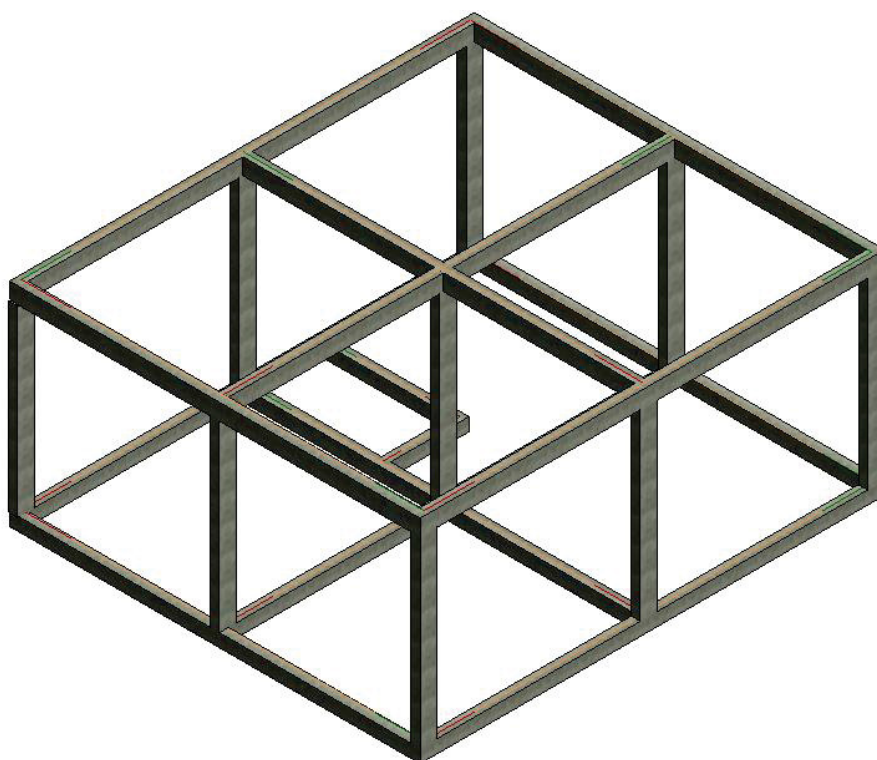
4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL E LEVANTAMENTO QUANTITATIVO DE MATERIAIS

Para a quantificação dos materiais da habitação em AC, LWF e LSF foi considerada a delimitação do estudo apresentada em 1.2. Inicialmente foi necessário dimensionar as estruturas e na sequência foram quantificados os materiais. Os índices de perdas (que correspondem ao desperdício) e as massas específicas, utilizados no levantamento quantitativo, estão apresentados no ANEXO A e foram utilizados para todas as fases do ciclo de vida e todos os sistemas construtivos.

4.1 ALVENARIA CONVENCIONAL

Para a alvenaria convencional foi inicialmente realizado o lançamento da subestrutura, composta por estacas e vigas baldrame e da superestrutura com pilares, cintas de amarração e lajes atendendo aos critérios mínimos dos componentes estruturais. Na FIGURA 19 está representada a superestrutura com os pilares e vigas da habitação em AC.

FIGURA 19 – SUPERESTRUTURA EM ALVENARIA CONVENCIONAL



FONTE: A autora (2019).

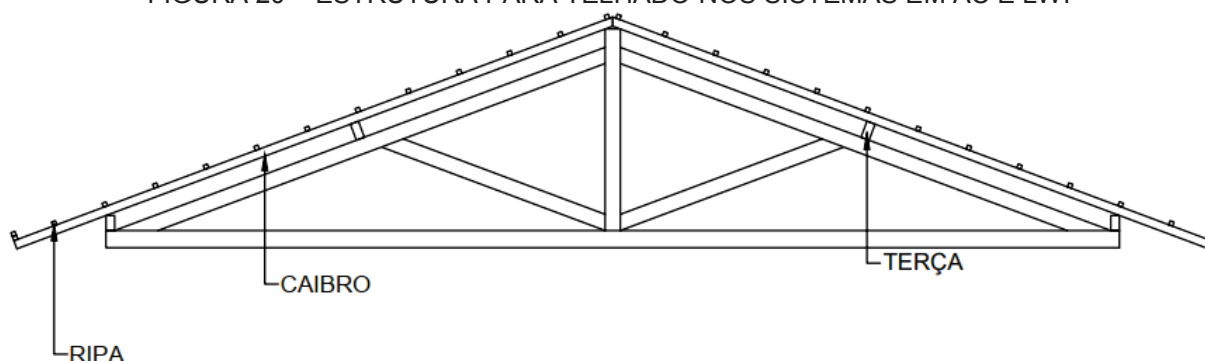
A composição de materiais da habitação em AC reflete a realidade brasileira, em que foram escolhidos aqueles de uso corrente para esse tipo de sistema construtivo. O aço utilizado corresponde à armação da fundação, da estrutura e das vergas nas esquadrias, com bitolas que variam de 5,0 mm a 10,0 mm, consideradas as perdas e as massas específicas conforme ANEXO A. O uso da areia, brita, cal hidratada e cimento Portland (CP II-32) correspondem à produção de concreto ($f_{ck} = 25 \text{ MPa}$) e argamassas para revestimento das paredes e contrapiso, conforme os traços descritos pela SINAPI.

Para as fôrmas de concretagem da estrutura (caixarias) foi escolhido o pinus, comumente encontrado no Sul do país, além de ser o tipo de madeira mais utilizado para este fim. As vigas baldrame receberam impermeabilizante asfáltico para proteção contra a umidade.

A madeira de pinus (segundo tipo de madeira mais utilizada), utilizada na estrutura da cobertura, recebeu o tratamento preservativo com CCA (arseniato de cobre cromatado) e que corresponde ao processo mais utilizado no país (IWAKIRI; PRATA, 2008; SILVA, 2006). O tipo de telha selecionada foi a telha cerâmica, conforme o projeto padrão de casas populares da CEF (2007).

O projeto de estrutura do telhado é composto por tesouras de seção transversal 4" x 6". As dimensões das terças e dos caibros são de 2" x 4" e das ripas 1" x 1", sendo o mesmo modelo utilizado para o sistema em AC e LWF (FIGURA 20).

FIGURA 20 – ESTRUTURA PARA TELHADO NOS SISTEMAS EM AC E LWF



FONTE: A autora (2019).

O levantamento quantitativo detalhado de materiais utilizados na construção da habitação em AC está no APÊNDICE B e o resumo dessas quantidades pode ser verificada no QUADRO 9. Não foi encontrado considerado índice de perdas para o

impermeabilizante asfáltico, portanto foi considerada apenas a quantidade necessária de projeto. Já para o processo de tratamento da madeira, utilizou-se o mesmo índice de desperdício da madeira tratada. As quantidades ideal e desperdício foram segmentadas da quantidade total a partir da aplicação dos índices de perdas apresentados no ANEXO A para cada material.

QUADRO 9 – QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO EM AC

MATERIAL	TOTAL	IDEAL	DESPERDÍCIO	UN.
AÇO	393,97	334,27	59,70	kg
AREIA	33.929,39	16.964,68	16.964,71	kg
BLOCO CERÂMICO	14.021,95	11.638,23	2.383,72	kg
BRITA	14.573,19	7.144,75	7.428,44	kg
CAL HIDRATADA	1.420,12	766,86	653,26	kg
FORMA PARA CONCRETAGEM - PINUS	6.915,82	5.530,05	1.385,77	kg
CIMENTO PORTLAND	5.821,90	3.493,13	2.328,77	kg
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	178,02	178,02	0,00	kg
MADEIRA PINUS	476,00	257,04	218,96	kg
TELHA CERÂMICA	1.910,44	1.700,29	210,15	kg
TRATAMENTO DA MADEIRA (CCA)	6,05	2,79	3,26	kg
PESO TOTAL	79.646,85	48.010,11	31.636,74	kg

FONTE: A autora (2019).

Para a operação da edificação foram consideradas as reposições de materiais conforme a norma ABNT NBR 15575 (2013), com os FR apresentados no QUADRO 7. Dessa forma, os materiais que compõem a cobertura tiveram reposição a cada 20 anos, portanto durante o uso da residência serão necessárias 1,5 reposição da telha cerâmica.

O transporte dos materiais foi considerado com base na distância entre a fábrica para produção dos insumos até o local do canteiro de obras, localizado no CESEC, conforma apresentado no APÊNDICE E. Este processo foi considerado tanto na pré-operação, para o transporte dos insumos necessários à construção, como na operação na reposição dos mesmos.

Para os materiais que fazem parte da vedação interna o FR também é 1,5, portanto multiplica-se o FR pela quantidade necessária de materiais para repor a vedação interna. Na vedação externa os materiais devem ser repostos a cada 40 anos, portanto durante a vida útil de 50 anos da habitação é necessário repor 0,25 vezes a quantidade de materiais (TABELA 1). Foi considerado que as vergas também

tiveram que ser repostas com a mesma frequência por estarem localizadas na vedação da casa.

TABELA 1 – QUANTIDADE DE MATERIAIS DA AC PARA REPOSIÇÃO DURANTE A OPERAÇÃO NA HABITAÇÃO EM AC

MATERIAL	COBERTURA		VEDAÇÃO INTERNA		VEDAÇÃO EXTERNA		QTDE. TOTAL (kg)
	FR	QTDE. (kg)	FR	QTDE. (kg)	FR	QTDE. (kg)	
AÇO	-	-	-	-	0,25	4,43	1,11
AREIA	-	-	1,50	13.606,00	0,25	6.346,13	21.995,53
BLOCO CERÂMICO	-	-	1,50	8.395,70	0,25	4.817,55	13.797,94
CAL HIDRATADA	-	-	1,50	894,76	0,25	525,34	1.473,48
FORMA PARA CONCRETAGEM	-	-	-	-	0,25	4.914,53	1.228,63
CIMENTO PORTLAND	-	-	1,50	1.620,64	0,25	756,92	2.620,19
TELHA CERÂMICA	1,5	1.910,44	-	-	-	-	2.865,66
PESO TOTAL	1,5	1.910,44	1,50	24.517,10	0,25	17.364,90	43.982,54

FONTE: A autora (2019).

O QUADRO 10 apresenta as quantidades de resíduos geradas por material e os destinos finais de acordo com os critérios de classificação da resolução N° 307 de 2002 do CONAMA (BRASIL, 2002), da possibilidade de desmontagem sem contaminação e se o material descartado possui valor de mercado, conforme a FIGURA 18.

QUADRO 10 – DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS GERADOS NA DESCONSTRUÇÃO DA HIS EM AC

MATERIAL	TOTAL	DESTINO FINAL
AÇO	393,97	Aterro de resíduos inertes
AREIA	26.650,97	Aterro de resíduos inertes
BLOCO CERÂMICO	14.021,95	Aterro de resíduos inertes
BRITA	6.199,24	Aterro de resíduos inertes
CAL HIDRATADA	1.420,12	Aterro de resíduos inertes
CIMENTO PORTLAND	4.305,66	Aterro de resíduos inertes
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	178,02	Aterro de resíduos inertes
MADEIRA PINUS	476,00	Aterro de resíduos perigosos
TELHA CERÂMICA	1.910,44	Aterro de resíduos inertes
TRATAMENTO DA MADEIRA (CCA)	6,05	Aterro de resíduos perigosos
PESO TOTAL	55.562,42	-
ATERRO DE RESÍDUOS INERTES	55.080,37	99%
ATERRO DE RESÍDUOS PERIGOSOS	482,05	1%

FONTE: A autora (2019).

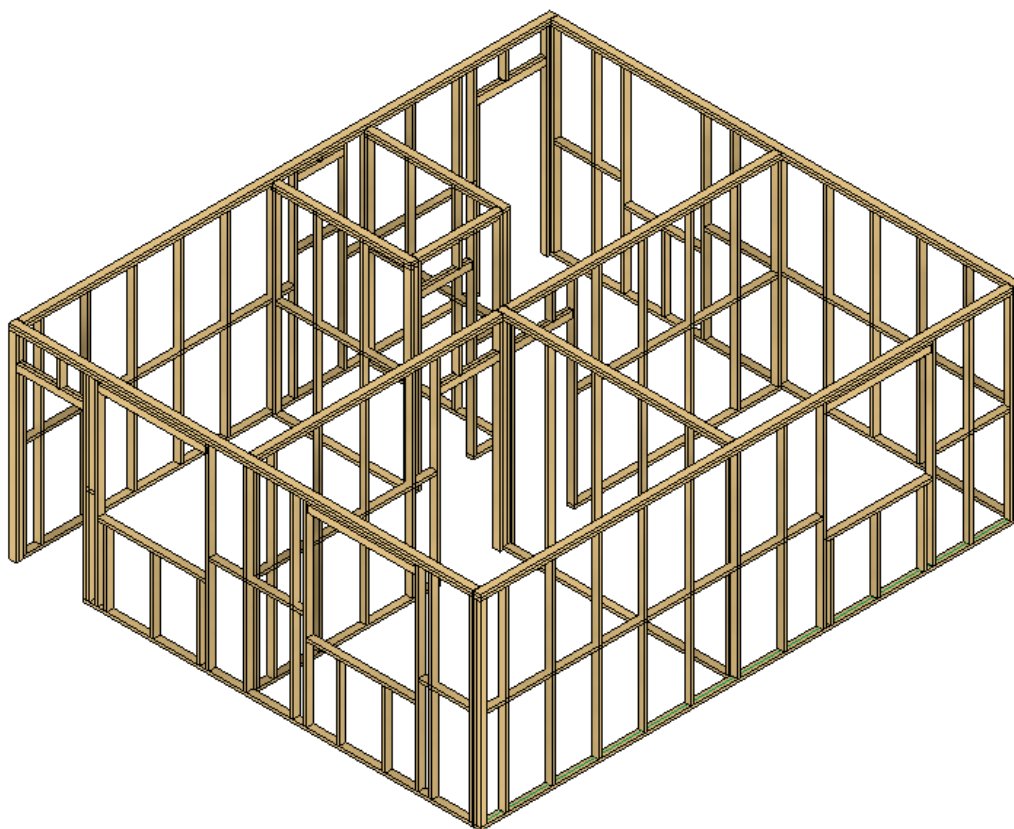
O cenário final dos resíduos caracterizou-se por encaminhar 99% dos materiais ao aterro de resíduos inertes e 1% ao aterro de resíduos perigosos, este último

correspondendo à madeira utilizada na estrutura da cobertura. O tratamento com CCA é composto por elementos tóxicos ao meio ambiente, como o arsênio e o cromo, de modo que os resíduos de madeira tratada devem ser classificados como perigosos (ABNT, 2004b; SANTOS et al., 2011).

4.2 LIGHT WOOD FRAMING

A estrutura em LWF foi quantificada após o auxílio de profissional especializado no dimensionamento e verificações de segurança e estabilidade das peças de madeira segundo a norma ABNT NBR 7190 (1997). O projeto da estrutura da cobertura é a mesma apresentada na FIGURA 20, assim como a escolha pela telha cerâmica. O modelo da estrutura em LWF está representado na FIGURA 21.

FIGURA 21 – SUPERESTRUTURA EM LWF



FONTE: A autora (2019).

Obtida a quantidade em m^3 de madeira para a estrutura do LWF, somou-se $7,0 \text{ kg/m}^3$ de CCA (do tratamento da madeira), conforme especifica a norma da DATec (BRASIL, 2018b). Em seguida foi convertida a quantidade de madeira tratada em m^3

para quilos conforme o índice de massa específica do ANEXO A, além das considerações de perdas. Portanto, a massa das peças de LWF é considerada como a soma da quantidade de madeira de pinus e da quantidade de CCA utilizado.

A quantidade total de aço é composta pela tela soldada do radier, pelos pregos, parafusos, grampos, cantoneiras e chumbadores usados na estrutura e nas paredes para unir as camadas de OSB, chapa de gesso, membrana hidrófuga e placa cimentícia. A areia, brita e madeira pinus foram utilizadas na fundação em radier, assim como o concreto Portland (CP II-32) de 30 MPa, conforme traço especificado no SINAPI. A madeira usada nos elementos estruturantes (soleira, montante, verga, bloqueador, telhado e laje) é a pinus (BRASIL, 2018b).

Ainda segundo a composição das paredes especificada no DATec (BRASIL, 2018b), na face externa foram contabilizadas chapas de OSB, membrana hidrófuga, placa cimentícia, tela em fibra de vidro e massa cola para placa cimentícia. No centro estão os elementos estruturais e lã mineral, já a face interna é composta pelas chapas de OSB, chapa de gesso e massa de *drywall*.

TABELA 2 - QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO EM LWF

MATERIAL	TOTAL	IDEAL	DESPERDÍCIO	UN.
AÇO	263,46	241,81	21,65	kg
AREIA	9.824,58	4.912,29	4912,29	kg
BRITA	7.081,54	4.248,92	2832,62	kg
FORMA PARA CONCRETAGEM - PINUS	698,28	593,54	104,74	kg
CIMENTO PORTLAND	2.792,24	1.675,34	1116,9	kg
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	289,8	289,8	-	kg
LÃ MINERAL	45,8	39,39	6,41	kg
MADEIRA PINUS	1.916,38	1.034,84	881,54	kg
MASSA COLA PARA PLACA CIMENTÍCIA	271,2	235,94	35,26	kg
MASSA DRYWALL	125,43	109,12	16,31	kg
MEMBRANA HIDRÓFUGA	9,5	7,6	1,9	kg
OSB	1.886,15	1.867,29	18,86	kg
PLACA CIMENTÍCIA	1.273,46	1.270,91	2,55	kg
CHAPA DE GESSO	1.879,61	1.842,01	37,6	kg
TELA DE FIBRA DE VIDRO	29,25	3,82	25,43	kg
TELHA CERÂMICA	1.910,44	1.700,29	210,15	kg
TRATAMENTO DA MADEIRA (CCA)	24,39	13,17	11,22	kg
PESO TOTAL	30.321,51	20.086,08	10.235,43	kg

FONTE: A autora (2019).

Nas juntas das placas cimentícias (face externa) e de *drywall* (face interna) foi utilizada fita de fibra de vidro com massa. Os desperdícios da fita em fibra de vidro foram calculados a partir da aquisição de rolos de 50 m x 0,05 m e da tela de fibra de vidro em rolos de 50 m x 1 m. Todas as quantidades utilizadas podem ser encontradas no APÊNDICE C.

A TABELA 3 contém as quantidades de reposição para os materiais que compõem a cobertura e as vedações interna e externa calculadas pela multiplicação dos FR pelas quantidades de materiais dos componentes considerados na construção.

TABELA 3 – QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA REPOSIÇÃO DURANTE A OPERAÇÃO NA HABITAÇÃO EM LWF

MATERIAL	COBERTURA		VEDAÇÃO INTERNA		VEDAÇÃO EXTERNA		QTDE. TOTAL (kg)
	FR	QTDE. (kg)	FR	QTDE. (kg)	FR	QTDE. (kg)	
AÇO	-	-	1,50	4,79	0,25	34,05	15,70
LÃ MINERAL	-	-	1,50	21,07	0,25	24,73	37,79
MASSA COLA PARA PLACA CIMENTÍCIA	-	-	-	-	0,25	271,20	67,80
MASSA DRYWALL	-	-	1,50	125,43	-	-	188,15
MEMBRANA HIDRÓFUGA	-	-	-	-	0,25	9,50	2,38
OSB	-	-	1,50	891,43	0,25	994,72	1.585,83
PLACA CIMENTÍCIA	-	-	-	-	0,25	1.273,46	318,37
CHAPA DE GESSO	-	-	1,50	1.879,61	-	-	2.819,42
TELA DE FIBRA DE VIDRO	-	-	1,50	8,40	0,25	20,85	17,81
TELHA CERÂMICA	1,5	1.910,44	-	-	-	-	2.865,66
PESO TOTAL	1,5	1.910,44	1,50	2.930,73	0,25	2.628,51	7.918,88

FONTE: A autora (2019).

No APÊNDICE E estão apresentadas as distâncias consideradas para transporte dos materiais na fase pré-operacional e operacional.

No QUADRO 11 estão descritas as quantidades e os respectivos destinos finais para os materiais gerados na desconstrução da habitação em LWF. Do total de resíduos gerados na desconstrução da HIS em LWF, 71% foi encaminhado ao aterro de inertes, 23% ao aterro sanitário, 5% ao aterro de resíduos perigosos e 1% à reciclagem.

QUADRO 11 – DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS GERADOS NA DESCONSTRUÇÃO DA HIS EM LWF

MATERIAL	TOTAL	DESTINO FINAL
AÇO	279,16	Reciclagem do aço

continua

MATERIAL	TOTAL	DESTINO FINAL
AREIA	9.824,58	Aterro de resíduos inertes
BRITA	7.081,54	Aterro de resíduos inertes
CIMENTO PORTLAND	2.792,24	Aterro de resíduos inertes
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	289,80	Aterro de resíduos inertes
LÃ MINERAL	83,59	Aterro sanitário
MADEIRA PINUS	1.916,38	Aterro de resíduos perigosos
MASSA COLA PARA PLACA CIMENTÍCIA	339,00	Aterro de resíduos inertes
MASSA DRYWALL	313,58	Aterro sanitário
MEMBRANA HIDRÓFUGA	11,88	Aterro sanitário
OSB	3.471,98	Aterro sanitário
PLACA CIMENTÍCIA	1.591,83	Aterro de resíduos inertes
CHAPA DE GESSO	4.699,03	Aterro sanitário
TELA DE FIBRA DE VIDRO	47,06	Aterro sanitário
TELHA CERÂMICA	4.776,10	Aterro de resíduos inertes
TRATAMENTO DA MADEIRA (CCA)	24,39	Aterro de resíduos perigosos
PESO TOTAL	37.542,11	-
ATERRO DE RESÍDUOS INERTES	26.695,09	71%
ATERRO SANITÁRIO	8.627,10	23%
ATERRO DE RESÍDUOS PERIGOSOS	1.940,77	5%
RECICLAGEM DO AÇO	279,16	1%

FONTE: A autora (2019).

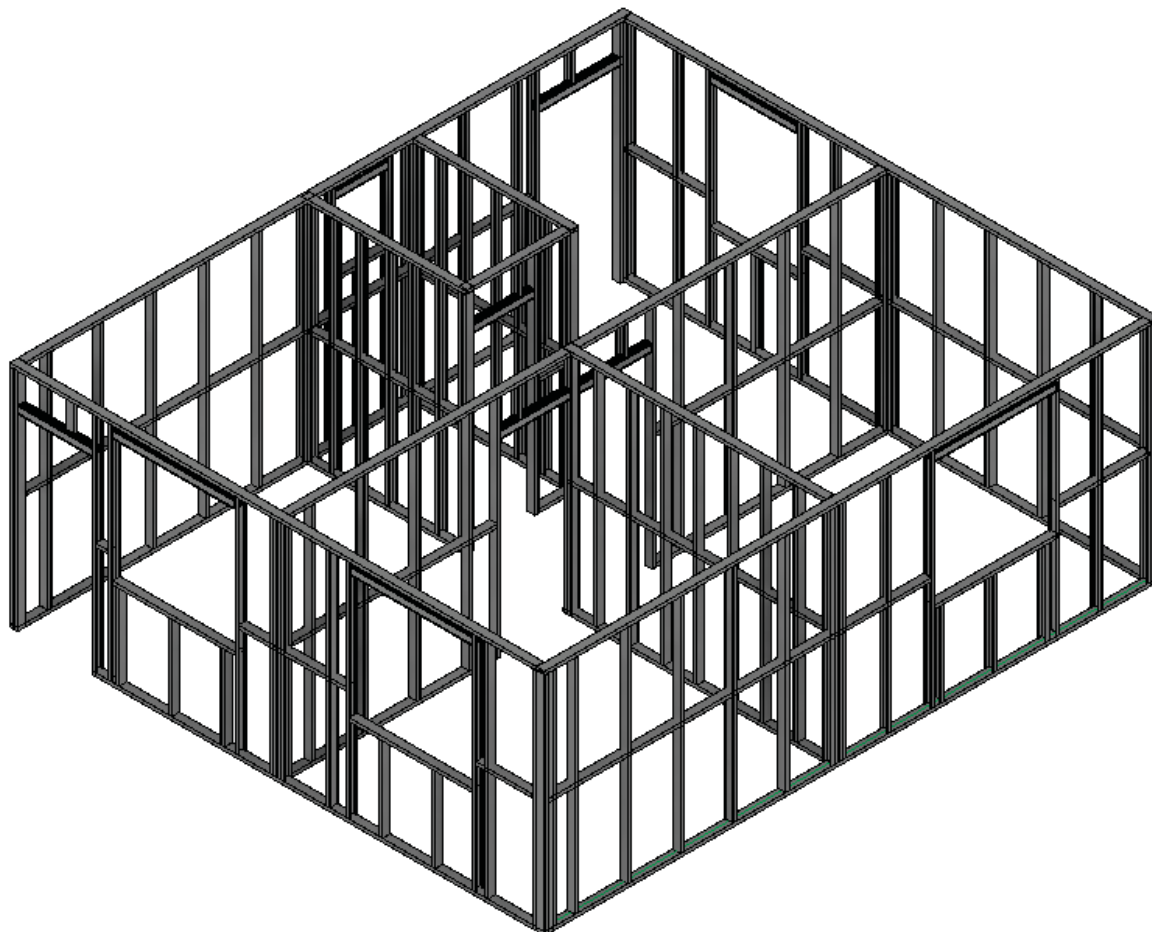
4.3 LIGHT STEEL FRAMING

Foi realizada a quantificação da habitação em LSF conforme as orientações constantes na DATec Nº 014b, SINAT Nº 003, normas ABNT NBR 14762 (2010) e ABNT NBR 15253 (2014) e no manual de construção em aço de Rodrigues e Caldas (2016). Na sequência, o projeto foi encaminhado para projetista estrutural em LSF que realizou as modificações e correções necessárias. Por fim, foi verificado o dimensionamento conforme as tabelas apresentadas pelo Centro Brasileiro da Construção em Aço (RODRIGUES, 2010). A estrutura com os perfis leves de aço está representada na FIGURA 22.

O sistema em LSF utiliza perfis de aço zincado conformados a frio, processo também chamado de galvanização eletrolítica, que serve para proteção dos elementos contra a corrosão, oxidação ou ataque de bactérias. Na zincagem a frio o aço recebe uma camada de zinco por meio da imersão em solução eletrolítica (ZEMPULSKI; ZEMPULSKI, 2007). Foi aplicado o processo de tratamento do aço para a quantidade de aço referente os perfis de aço e elementos de ligação dos mesmos, seguindo a orientação dada pela base de dados Ecoinvent, em que para cada

tonelada de aço são necessários 64 m² do tratamento. Para o processo de tratamento do aço foi usado o mesmo índice de desperdício do aço galvanizado.

FIGURA 22 – SUPERESTRUTURA EM LSF



FONTE: A autora (2019).

A quantidade de parafusos e pregos utilizados para as ligações das peças foi estimada conforme as informações dos fabricantes quanto aos espaçamentos mínimos e orientações de orçamentista.

A solução adotada para fundação foi a mesma da construção em LWF, com radier concretado *in loco* com concreto de resistência fck 30 MPa e tela soldada. As paredes de vedação externa são compostas por siding vinílico, membrana hidrófuga, placa de OSB, perfis leves de aço, lã mineral, placa de OSB e chapa de gesso. Já as paredes de vedação interna têm chapa de gesso, perfis de aço, lã mineral, placa de OSB e chapa de gesso (BRASIL, 2016b). Nas juntas das chapas de gesso foi utilizada

fita de fibra de vidro com massa para *drywall* (desperdícios da fita em fibra de vidro foram calculados a partir da aquisição de rolos de 50 m x 0,05 m).

A estrutura da cobertura, diferente dos sistemas anteriores que utilizaram tesouras, deu-se pelo prolongamento dos perfis montantes de aço, que é uma solução frequentemente adotada nas construções em LSF (MASS, 2017). Quanto à cobertura, optou-se pela telha de fibrocimento conforme mencionado no SiNAT (2016b). Não foi encontrado na literatura o índice de desperdício para o siding vinílico, de modo que foi considerada como quantidade total a necessária para execução do revestimento externo. No APÊNDICE D são encontradas todas as quantidades detalhadas usadas no sistema em LSF.

TABELA 4 - QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO EM LSF

MATERIAL	TOTAL	IDEAL	DESPERDÍCIO	UN
AÇO	1278,67	1.253,10	25,57	kg
AREIA	9.824,58	4.912,29	4.912,29	kg
BRITA	7.081,54	4.248,92	2.832,61	kg
FORMA PARA CONCRETAGEM - PINUS	698,28	593,54	104,74	kg
CIMENTO PORTLAND	2.792,24	1.675,34	1.116,89	kg
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	289,80	289,80	-	kg
LÃ MINERAL	45,80	39,39	6,41	kg
MASSA DRYWALL	125,43	109,12	16,31	kg
MEMBRANA HIDRÓFUGA	9,50	7,60	1,90	kg
OSB	1.886,15	1.867,29	18,86	kg
CHAPA DE GESSO	1.879,61	1.842,01	37,59	kg
SIDING VINÍLICO	154,80	154,80	-	kg
TELA DE FIBRA DE VIDRO	8,40	8,13	0,27	kg
TELHA DE FIBROCIMENTO	765,26	688,74	76,53	kg
TRATAMENTO DO AÇO (GALVANIZAÇÃO)	77,53	75,98	1,55	m ²
PESO TOTAL	26.840,05	17.690,07	9.149,97	kg

FONTE: A autora (2019).

Para a reposição de materiais na fase de operação foram considerados os mesmos FR para cobertura, vedação interna e vedação externa dos sistemas anteriores (TABELA 5).

Foi também contabilizado o transporte dos materiais utilizados na pré-operação e operação da construção, conforme o APÊNDICE E.

TABELA 5 – QUANTIDADE DE MATERIAIS PARA REPOSIÇÃO DURANTE A OPERAÇÃO NA HABITAÇÃO EM LSF

MATERIAL	COBERTURA		VEDAÇÃO INTERNA		VEDAÇÃO EXTERNA		QTDE. TOTAL (kg)
	FR	QTDE. (kg)	FR	QTDE. (kg)	FR	QTDE. (kg)	
AÇO	-	-	1,50	7,00	0,25	33,74	18,93
LÃ MINERAL	-	-	1,50	21,07	0,25	24,73	37,79
MASSA DRYWALL	-	-	1,50	125,43	-	-	188,15
MEMBRANA HIDRÓFUGA	-	-	-	-	0,25	9,50	2,38
OSB	-	-	1,50	891,43	0,25	994,72	1.585,83
CHAPA DE GESSO	-	-	1,50	1.879,61	-	-	2.819,41
SIDING VINÍLICO	-	-	-	-	0,25	154,80	38,70
TELA DE FIBRA DE VIDRO	-	-	1,50	8,40	-	-	12,60
TELHA DE FIBROCIMENTO	1,50	765,26	-	-	-	-	1.147,89
TRATAMENTO DO AÇO*	-	-	1,50	*0,45	0,25	*2,16	*1,22
PESO TOTAL	1,50	765,26	1,50	2.933,39	0,25	1.217,49	5.852,35

* unidade em metros cúbicos (m³)

FONTE: A autora (2019).

Na pós-operação considerou-se que dos resíduos gerados na desmontagem da habitação em LSF, a madeira tratada e a telha de fibrocimento foram encaminhadas para o aterro de resíduos perigosos. O restante dos materiais foi encaminhado para o aterro sanitário ou aterro de inertes (QUADRO 12).

QUADRO 12 – DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS GERADOS NA DESCONSTRUÇÃO DA HIS EM LSF

MATERIAL	TOTAL	DESTINO FINAL
AÇO	1.297,60	Reciclagem do aço
AREIA	9.824,58	Aterro de resíduos inertes
BRITA	7.081,54	Aterro de resíduos inertes
CIMENTO PORTLAND	2.792,24	Aterro de resíduos inertes
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	289,80	Aterro de resíduos inertes
LÃ MINERAL	83,59	Aterro sanitário
MASSA DRYWALL	313,58	Aterro sanitário
MEMBRANA HIDRÓFUGA	11,88	Aterro sanitário
OSB	3.471,98	Aterro sanitário
CHAPA DE GESSO	4.699,03	Aterro sanitário
SIDING VINÍLICO	193,50	Reciclagem do PVC
TELA DE FIBRA DE VIDRO	21,00	Aterro sanitário
TELHA DE FIBROCIMENTO	1.913,15	Aterro de resíduos perigosos
TRATAMENTO DO AÇO (GALVANIZAÇÃO)	78,74	-
PESO TOTAL	31.993,44	
ATERRO DE RESÍDUOS INERTES	19.988,15	62%
ATERRO SANITÁRIO	8.601,04	27%
ATERRO DE RESÍDUOS PERIGOSOS	1.913,15	6%
RECICLAGEM DO AÇO	1.297,60	4%
RECICLAGEM DO PVC	193,50	1%

FONTE: A autora (2019).

5 DESENVOLVIMENTO DA ACV

O estudo de ACV da presente pesquisa seguiu a estrutura apresentada na ABNT NBR 14040 (2009a).

5.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo da ACV consiste em avaliar os impactos ambientais causados ao longo do ciclo de vida de HIS em AC, LWF e LSF, bem como gerar informações que auxiliem profissionais na escolha de materiais que incentivem o desenvolvimento sustentável.

5.1.1 Definição da função

Servir de moradia para uma família de baixa renda, descrita como uma HIS.

5.1.2 Unidade funcional

Abrigar família de baixa renda durante 50 anos, com as reposições necessárias durante o uso da habitação.

5.1.3 Fluxo de referência

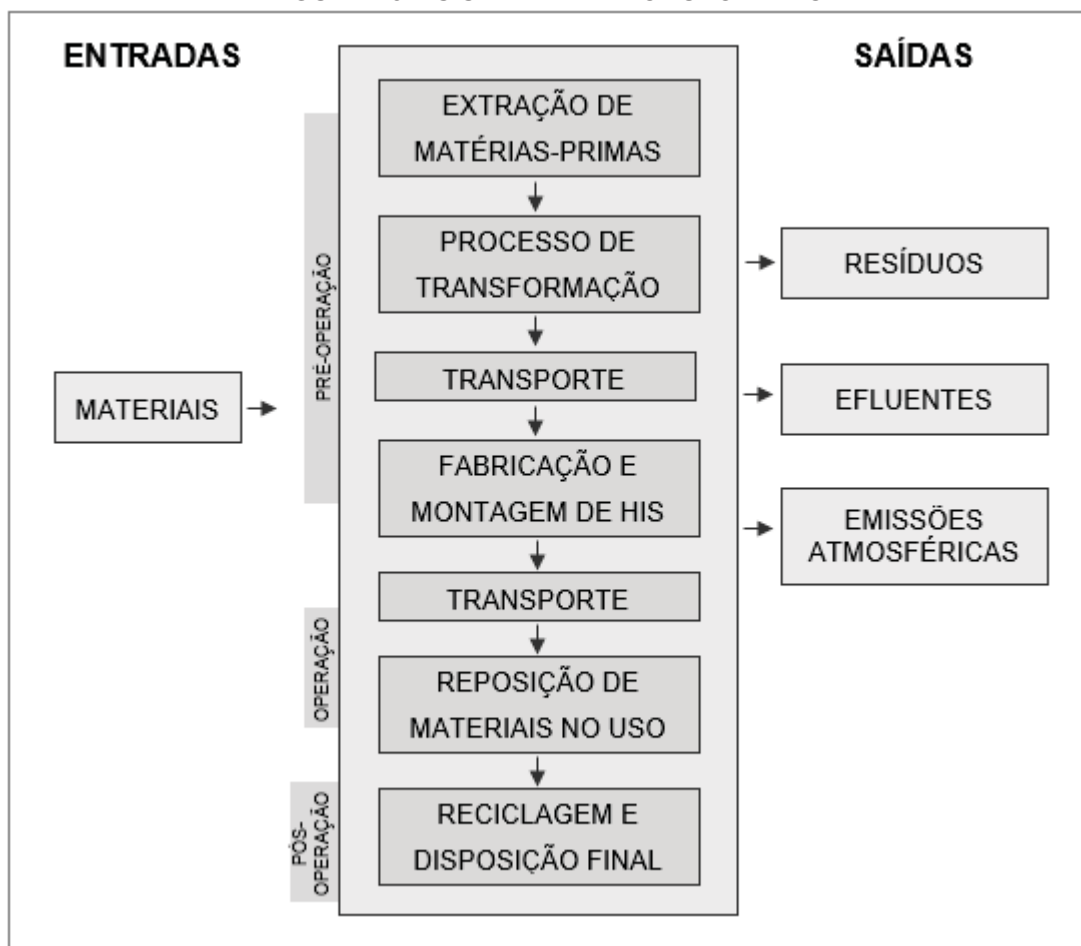
Uma residência, que inclui os materiais necessários para a subestrutura (fundação), superestrutura, vedações e cobertura. Foram excluídos do estudo pinturas e acabamentos, assim como os itens comuns aos três sistemas construtivos (ex. instalações elétricas, instalações hidráulicas e esquadrias), que não influenciaram no estudo comparativo.

5.1.4 Sistema de produto

O sistema de produto abrange o berço até o túmulo, com o uso de dados secundários extraídos da base de dados Ecoinvent. Considerou-se a extração de matérias-primas, manufatura dos materiais, transporte dos materiais até o local da

obra, fabricação das HIS, transporte de materiais e reposições e disposição final ou reciclagem. A FIGURA 23 apresenta o fluxograma com os processos, entradas e saídas considerados no estudo.

FIGURA 23 – SISTEMA DE PRODUTO DA ACV



FONTE: A autora (2019).

5.1.5 Limites do sistema

Fazem parte do sistema de produto:

- Conversão das matérias-primas em elementos necessários à manufatura dos materiais de construção;
- Manufatura dos materiais que compõem as habitações;
- Transporte da fábrica ao canteiro de obras/local da edificação;
- Reposição dos materiais durante a vida útil de 50 anos para as HIS;
- Destinação dos resíduos gerados pela desconstrução da edificação.

Não fazem parte do sistema de produto:

- Produção e manutenção de infraestrutura (máquinas, meios de transporte, estradas, etc);
- Consumo de energia elétrica e de água;
- Instalações complementares e acabamentos.

5.1.6 Critério de corte

Não foi adotado critério de corte para a exclusão de dados no levantamento quantitativo, no entanto a base de dados adotada utilizou critérios de alocação.

5.1.7 Qualidade dos dados

Os dados de entrada relacionados às quantidades levantadas para cada sistema construtivo são primários e estimados a partir do estudo de caso. Já os dados de saída são secundários e extraídos da base de dados Ecoinvent. Foram adotados dados genéricos em relação à localização geográfica (RoW (*Rest of World*)), que é uma média mundial desconsiderando os valores do continente europeu, de modo que a qualidade dessas informações segundo a matriz pedigree torna-se baixa (5).

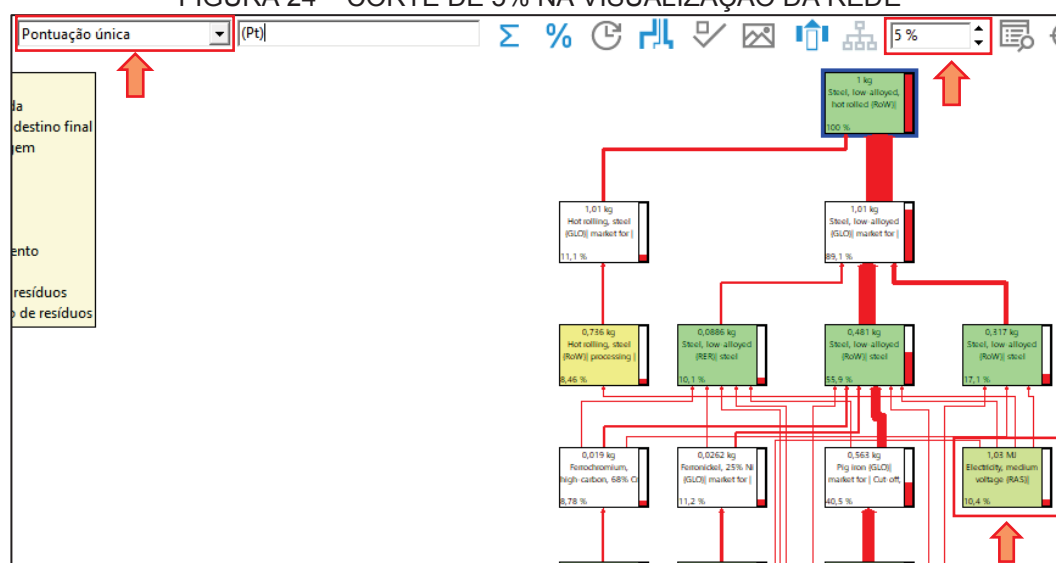
Dessa forma, foi adotada a estratégia de tornar os dados mais específicos para o Brasil a partir do critério de relevância ambiental de 5%, ou seja, foram adaptados os processos de eletricidade que fazem parte dos itens 95% mais relevantes ambientalmente de cada material do quantitativo, alterando-se a matriz de eletricidade genérica para a nacional.

Para identificar os processos a serem adaptados, foi utilizado o método IMPACT 2002+ com pontuação única na avaliação dos impactos, pois adota fatores iguais a 1, não atribuindo pesos diferentes às categorias de impacto.

Apresenta-se o passo a passo da adaptação segundo o critério de relevância ambiental de 5%:

- i. Gerar a rede de impacto de cada sistema construtivo;
- ii. Identificar os processos de eletricidade com participação ambiental com maior que 5% (aplicar corte na visualização da rede segundo pontuação única);

FIGURA 24 – CORTE DE 5% NA VISUALIZAÇÃO DA REDE



FONTE: A autora (2019).

- iii. Iniciar as adaptações pelos processos superiores, pois eles alteram os processos subsequentes e suas relações;
- iv. Seguir as adaptações pelos processos localizados na mesma linha, de cima para baixo; gerar novamente a rede e repetir até que todos os processos de consumo de eletricidade relevantes (acima de 5% de relevância ambiental segundo a pontuação única) sejam alterados para a matriz brasileira.

5.1.8 Considerações do estudo

Os itens referentes à placa cimentícia, membrana hidrófuga, cola para placa cimentícia, massa para drywall, siding vinílico foram selecionados itens similares, adotando-se materiais que têm composição mais parecida. Por exemplo o material siding vinílico não existe na base de dados, portanto foi adotado o material PVC, já que o revestimento é composto integralmente de PVC. O mesmo raciocínio foi adotado para os demais itens.

No caso dos processos de tratamento do aço (galvanização) e da madeira com CCA foram considerados separadamente aos materiais que os recebem. No QUADRO 13 estão descritos os materiais presentes no quantitativo dos sistemas construtivos e os correspondentes selecionados na base de dados Ecoinvent.

QUADRO 13 – MATERIAIS SELECIONADOS NA BASE DE DADOS

Material	Correspondente na base de dados
AÇO	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production Cut-off, U
AREIA	Sand {RoW} gravel and quarry operation Cut-off, U
BLOCO CERÂMICO	Clay brick {RoW} production Cut-off, U
BRITA	Gravel, crushed {RoW} production Cut-off, U
CAL HIDRATADA	Lime, packed {RoW} lime production, milled, packed Cut-off, U
FORMA PARA CONCRETAGEM - PINUS	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RoW} production Cut-off, U
CIMENTO PORTLAND	Cement, Portland {RoW} production Cut-off, U
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	Bitumen seal, VA4 {RoW} production Cut-off, U
LÃ MINERAL	Glass wool mat {BR} production Cut-off, U
MADEIRA PINUS	Sawnwood, hardwood, dried (u=10%), planed {RoW} production Cut-off, U
MASSA COLA PARA PLACA CIMENTÍCIA	Base plaster {RoW} production Cut-off, U
MASSA DRYWALL	Acrylic filler {RoW} production Cut-off, U
MEMBRANA HIDRÓFUGA	Polypropylene, granulate {RoW} production Cut-off, U
OSB	Oriented strand board {RoW} production Cut-off, U
PLACA CIMENTÍCIA	Cement mortar {RoW} production Cut-off, U
CHAPA DE GESSO	Gypsum plasterboard {RoW} production Cut-off, U
SIDING VINÍLICO	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW} polyvinylchloride production, suspension polymerisation Cut-off, U
TELA DE FIBRA DE VIDRO	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {RoW} production Cut-off, U
TELHA CERÂMICA	Ceramic tile {RoW} production Cut-off, U
TELHA DE FIBROCIMENTO	Fibre cement roof slate {RoW} production Cut-off, U
TRATAMENTO DA MADEIRA	Wood preservation, vaccum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact {RoW} wood preservation, vacuum pressure method, inorganic salt, containing Cr, outdoor use, ground contact Cut-off, U
TRATAMENTO DO AÇO	Zinc coat, coils {RoW} zinc coating, coils Cut-off, U
TRANSPORTE	Transport, freight, lorry, unspecified {RoW} transport, freight, lorry, all sizes, EURO6 to generic market for Cut-off, U

FONTE: A autora (2019).

5.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Nesta fase da ACV é explicitado o processo de cadastro dos materiais no *software* SimaPro para as três fases do ciclo de vida, a partir do uso de dados secundários extraído da base Ecoinvent.

5.2.1 Cadastro de materiais

Existem seis versões dessa base de dados, de modo que a utilizada no presente trabalho é a Ecoinvent 3.4 – *allocation, cut-off by classification – unit*, por não considerar o benefício de materiais recicláveis ou do reuso de resíduos ou co-produtos. Ou seja, os impactos não são reduzidos para materiais que podem ser reciclados, considerando-se então de fato os impactos que ocorrem no processo produtivo (ECOINVENT, 2018b).

Os materiais cadastrados na fase de pré-operação são aqueles necessários para a construção da edificação com as suas respectivas quantidades. Para a fase de operação foram considerados todos os materiais necessários para reposição durante a vida útil de 50 anos da habitação com base no FR. Quanto à última fase do ciclo de vida, a pós-operação, foram criados cenários para disposição final dos resíduos gerados a partir da demolição da casa ao final da sua vida útil.

Esse cenário considerou o percentual relativo à massa total que é encaminhada para cada destino. No caso da AC, 99% da massa foi encaminhada ao aterro de resíduos inertes e 1% para o aterro de resíduos perigosos, este último referente à madeira de pinus tratada com CCA.

No cenário final dos resíduos da habitação em LSF, 62% da massa teve como destino o aterro de inertes, 27% o aterro sanitário, 6% o aterro de resíduos perigosos, 4% refere-se ao aço reciclado e 1% ao PVC reciclado.

Quanto ao cenário dos resíduos gerados pela demolição da residência em LWF, 71% foi encaminhado ao aterro de inertes, 23% ao aterro sanitário, 5% ao aterro de resíduos perigosos e 1% equivale à massa de aço reciclado.

5.2.2 Alocação

No processo de desenvolvimento do inventário e levantamento de dados não foi realizada alocação, já a base de dados Ecoinvent utilizada se baseia no princípio da alocação.

5.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Para classificar os resultados levantados a partir do ICV foi utilizado o método IMPACT 2002+, escolhido a partir do estudo de revisão sistemática de Ramos, Santos e Maceno (2019) que o identificou como um dos mais utilizados em estudos relacionados à construção civil, juntamente com o TRACI 2.1 e o CML baseline, além de ser o único dentre esses três que tem a possibilidade de apresentar um resultado final único, que engloba todas as categorias analisados e retorna a melhor opção ambiental, chamada de pontuação única.

As categorias de impacto consideradas foram selecionadas a partir dos métodos mais utilizados na avaliação de impactos da construção (IMPACT 2002+, CML baseline e TRACI). Na sequência foram selecionadas as categorias comuns entre os três métodos: acidificação (aquática e terrestre), eutrofização, ecotoxicidade (aquática e terrestre), aquecimento global e depleção da camada de ozônio.

Os resultados encontrados a partir da aplicação do método aos dados de inventário estão apresentados no próximo capítulo e foram avaliados segundo as fases da ACV, as etapas de construção (QUADRO 14) e os materiais de construção utilizados na pré-operação.

QUADRO 14 –CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS SEGUNDO AS ETAPAS DA CONSTRUÇÃO

ETAPA DA CONSTRUÇÃO	AC	LWF	LSF
SUBESTRUTURA	AÇO	AÇO	AÇO
	AREIA	AREIA	AREIA
	BRITA	BRITA	BRITA
	IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO
	FORMA PARA CONCRETAGEM	FORMA PARA CONCRETAGEM	FORMA PARA CONCRETAGEM
	CIMENTO PORTLAND	CIMENTO PORTLAND	CIMENTO PORTLAND
SUPERESTRUTURA	AÇO	MADEIRA PINUS	AÇO
	AREIA	AÇO	TRATAMENTO DO AÇO
	BRITA	TRATAMENTO CCA	-
	CAL	-	-
	CIMENTO PORTLAND	-	-
	FORMA PARA CONCRETAGEM	-	-
	BLOCO CERÂMICO	-	-

continua

ETAPA DA CONSTRUÇÃO	AC	LWF	LSF
VEDAÇÕES	AÇO	CHAPA DE GESSO	CHAPA DE GESSO
	AREIA	OSB	OSB
	BLOCO CERÂMICO	LÃ MINERAL	LÃ MINERAL
	CAL HIDRATADA	MEMBRANA HIDRÓFUGA	MEMBRANA HIDRÓFUGA
	CIMENTO PORTLAND	AÇO	AÇO
	FORMA PARA CONCRETAGEM	MASSA DRYWALL	MASSA DRYWALL
	-	MASSA COLA PARA PLACA CIMENTÍCIA	CIMENTO PORTLAND
	-	CIMENTO PORTLAND	AREIA
	-	AREIA	FIBRA DE VIDRO
	-	FIBRA DE VIDRO	SIDING VINÍLICO
	-	PLACA CIMENTÍCIA	-
COBERTURA	MADEIRA PINUS	MADEIRA PINUS	AÇO
	TRATAMENTO DA MADEIRA	TRATAMENTO DA MADEIRA	TRATAMENTO DO AÇO
	TELHA CERÂMICA	TELHA CERÂMICA	TELHA DE FIBROCIMENTO

FONTE: A autora (2019).

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo os resultados foram apresentados em termos percentuais que expõem os impactos ambientais relacionados aos materiais utilizados em cada sistema construtivo e a fase do ciclo de vida, de modo a facilitar a interpretação dos valores encontrados. É possível visualizar os valores dos impactos nos APÊNDICES F, G e H. Podem haver pequenas diferenças de arredondamento no somatório dos impactos devido ao número de casas decimais utilizado nos cálculos do *software*, as quais não interferiram na interpretação dos resultados.

Primeiramente foram expostas as contribuições de cada fase do ciclo de vida do sistema construtivo analisado. Na sequência da exposição dos resultados de cada sistema construtivo foi realizada análise das informações.

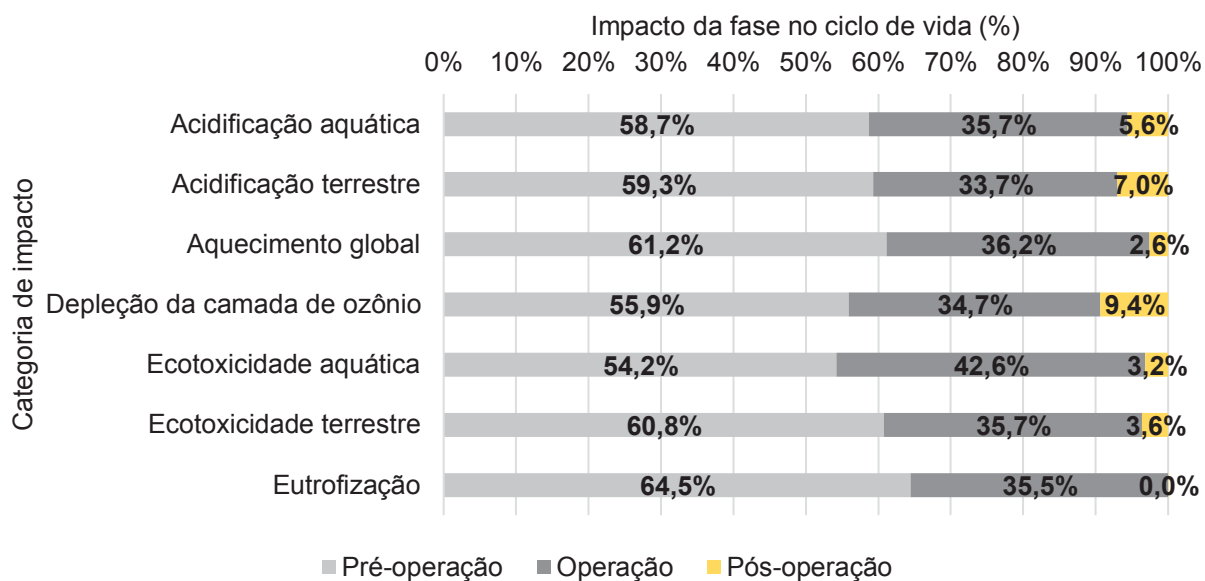
Na sequência foi detalhada a fase pré-operacional (ou fase de construção), com as contribuições das diferentes etapas da construção (subestrutura, superestrutura, vedações e cobertura) e dos materiais utilizados. Todos esses resultados utilizaram a base de dados Ecoinvent adaptada para a matriz de eletricidade brasileira, obedecendo o critério de corte de 5%. Por último foram comparadas as bases de dados original e a adaptada (para a eletricidade brasileira).

6.1 IMPACTOS DO SISTEMA EM ALVENARIA CONVENCIONAL

O GRÁFICO 2 apresenta a participação das três fases do ciclo de vida da habitação em AC em relação às categorias de acidificação aquática, acidificação terrestre, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre e eutrofização.

A fase pré-operacional foi a mais relevante do ciclo de vida para todas as categorias de impacto, seguida pela operação e pela pós-operação. A pré-operação teve a sua maior contribuição em relação às demais fases ao ser avaliado o impacto de ecotoxicidade terrestre, com 68,7%. Já a operação teve a maior participação na ecotoxicidade aquática. E a pós-operação na depleção da camada de ozônio.

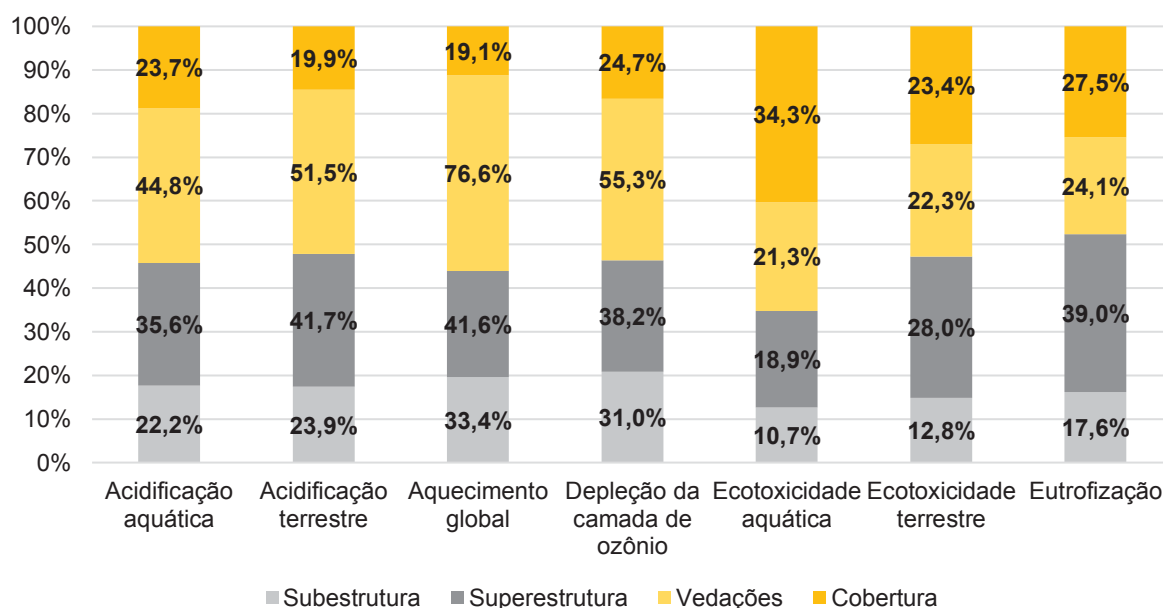
GRÁFICO 2 – IMPACTOS DAS FASES DA ACV NA HABITAÇÃO EM AC



FONTE: A autora (2019).

Na sequência, a habitação foi segmentada nas etapas de subestrutura, superestrutura, vedações e cobertura. A massa correspondente à subestrutura foi de 21.627,15 kg, à superestrutura 18.810,56 kg, às vedações 36.816,55 kg e à cobertura 2.392,49 kg.

FIGURA 25 – IMPACTOS DAS ETAPAS DA CONSTRUÇÃO NA HABITAÇÃO EM AC



FONTE: A autora (2019).

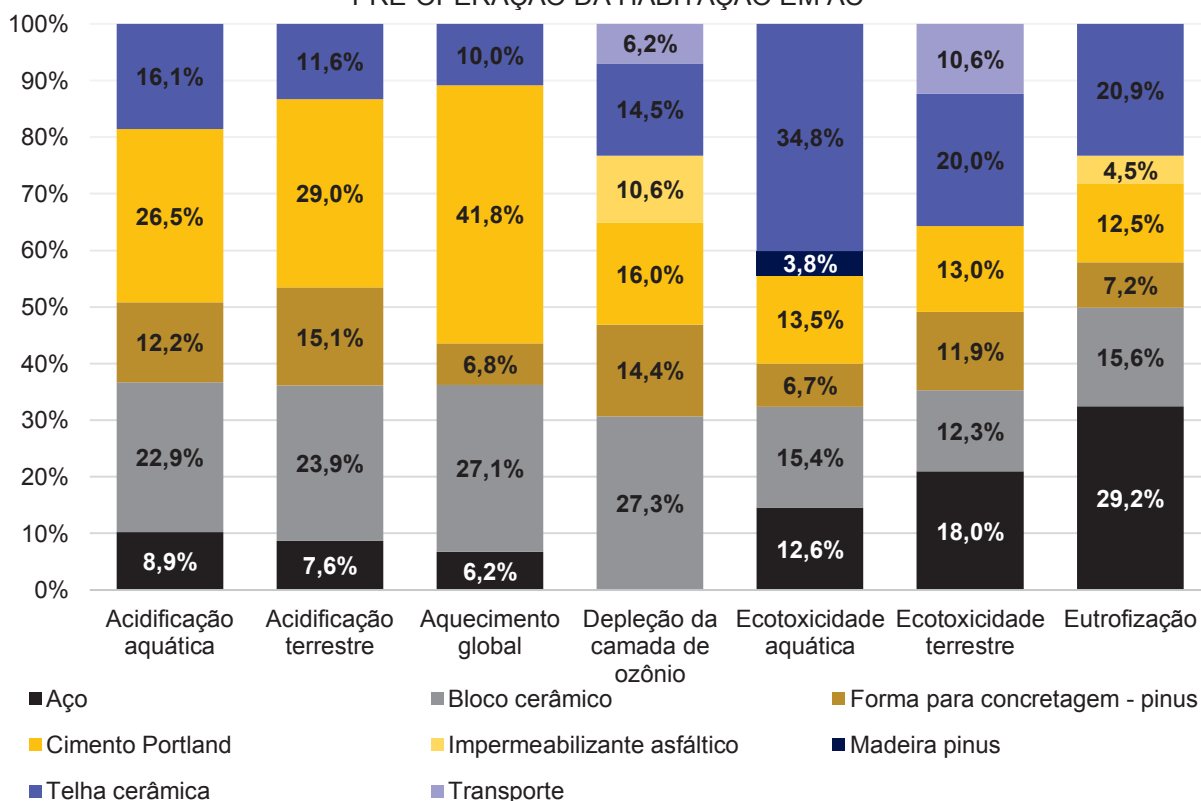
A FIGURA 25 expõe as contribuições das quatro etapas da construção para as categorias de impacto. Nesta análise foram considerados apenas os materiais usados na pré-operação.

Verificou-se que a subestrutura (estacas e vigas baldrame em concreto armado, forma e impermeabilizante) se destacou como a principal etapa contribuidora para a depleção da camada de ozônio.

Já a superestrutura (composta pelas vigas, pilares, lajes em concreto armado, formas) não apresentou as maiores contribuições para nenhuma categoria de impacto.

A etapa de vedações (alvenaria, chapisco e reboco, vergas e formas) apresentou os maiores impactos para a acidificação aquática, acidificação terrestre, aquecimento global, ecotoxicidade aquática e ecotoxicidade terrestre. Quanto à cobertura (estrutura para o telhado e telhas), foi a etapa que mais contribuiu para a eutrofização.

GRÁFICO 3 – IMPACTOS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO E PROCESSOS UTILIZADOS NA PRÉ-OPERAÇÃO DA HABITAÇÃO EM AC



FONTE: A autora (2019).

A pré-operação também foi analisada segundo o impacto causado pelos materiais e processos. No GRÁFICO 3 estão representadas as percentagens relativas dos materiais que mais contribuíram para os impactos ambientais em estudo.

De modo geral, os materiais responsáveis pelos maiores impactos foram o bloco cerâmico, o cimento Portland, o aço e a telha cerâmica. Os materiais que tiveram as menores contribuições para os impactos foram reunidos no item “outros”.

Além disso, o impacto causado por um material é resultante da contribuição dos processos que fazem parte da sua fabricação. Em relação à pré-operação, na categoria de acidificação aquática o cimento Portland foi o mais relevante devido ao processo de produção do clínquer. O mesmo resultado se repetiu para a acidificação terrestre e aquecimento global.

Para a depleção da camada de ozônio destacou-se a produção de blocos cerâmicos devido ao consumo de combustíveis fósseis para a queima dos tijolos. Para a ecotoxicidade aquática e terrestre a fabricação de telhas cerâmicas obteve os maiores índices, relacionado ao uso de zinco e de dióxido de titânio na esmaltação das telhas. Para a eutrofização o aço foi o material mais relevante, devido ao tratamento dos resíduos gerados pela atividade de mineração.

Os resultados apresentados são um cenário estimado sobre os impactos causados pelos materiais utilizados no ciclo de vida de uma habitação em AC. Isso auxilia na escolha dos materiais a serem utilizados em uma habitação, assim como na definição de processos alternativos que reduzam os impactos ambientais.

Ao analisar os impactos causados pelos materiais usados na pré-operação e operação da habitação em AC notou-se que os materiais que apresentaram os maiores índices de impacto em geral foram o bloco cerâmico, o cimento Portland e a telha cerâmica.

Para o cenário final dos materiais gerados na desconstrução da casa ao fim da sua vida útil foi considerada a massa incorporada que seguiu para os destinos predefinidos, portanto os resultados não são apresentados por material, mas por destino.

Verificou-se que apesar de apenas 1% da massa ter sido destinada ao aterro de resíduos perigosos respondeu pela participação de 5% a 28% dos impactos avaliados na pós-operação.

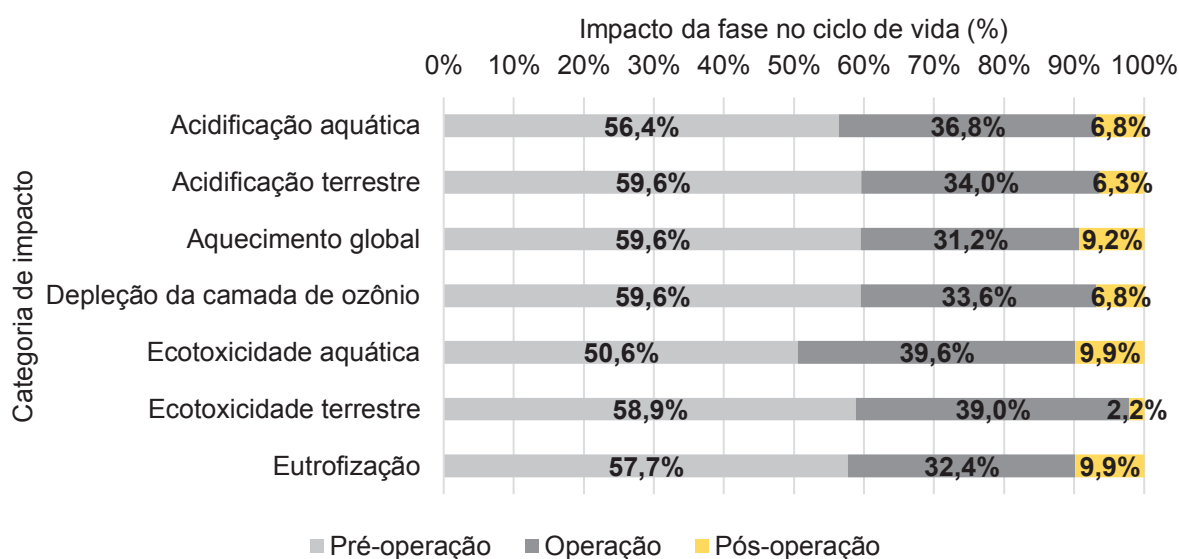
Em comparação aos resultados apresentados em Tavares (2006), os materiais que mais se destacaram em termos de emissão de CO₂ foram o cimento, a cerâmica

vermelha e as tintas, coerente com os resultados apresentados, com exceção da tinta que não foi analisada. Em Monich (2012) e Mass (2017) os materiais que apresentaram maiores emissões de CO₂ na pré-operação foram aço, cimento, tijolos e telha, os mesmos encontrados neste estudo.

6.2 IMPACTOS DO SISTEMA EM *LIGHT WOOD FRAMING*

O GRÁFICO 4 apresenta os impactos das três fases do ciclo de vida da habitação em LWF, em que a fase pré-operacional teve participação média de 58% de impacto em relação a todo o ciclo de vida, sendo a fase mais relevante, seguida pela fase operacional com aproximadamente 35% dos impactos totais e pela fase pós-operacional com 7%.

GRÁFICO 4 – IMPACTOS DAS FASES DA ACV NA HABITAÇÃO EM LWF



FONTE: A autora (2019).

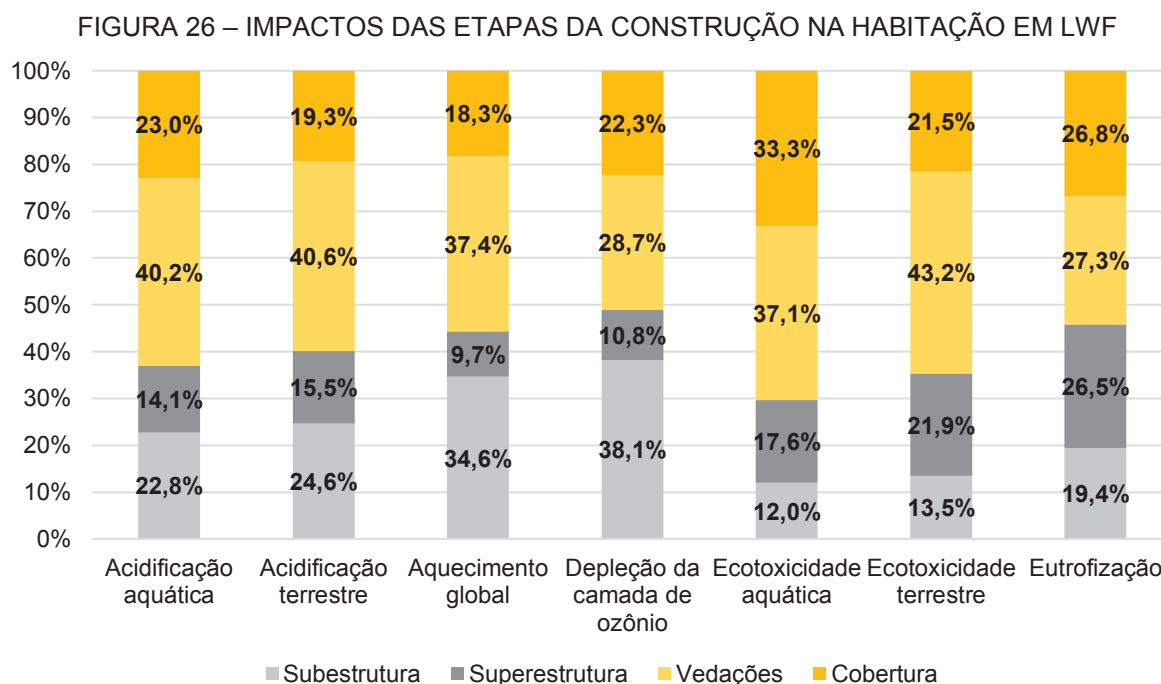
Com a segmentação da construção, a massa dos materiais na pré-operação se deu pela soma da subestrutura com 17.501,22 kg, da superestrutura com 1.616,75 kg, das vedações com 8.811,05 kg e da cobertura com 2.392,49 kg.

Quanto aos impactos das etapas da construção, a FIGURA 26 mostra que as vedações são a principal etapa da construção em relação aos impactos avaliados.

A subestrutura (aço, areia, brita, impermeabilizante asfáltico, fôrma e cimento Portland) teve a sua maior participação na depleção da camada de ozônio. A

superestrutura (madeira pinus, aço e tratamento da madeira) e a cobertura não foram responsáveis pelos maiores impactos em nenhuma das categorias.

As vedações (chapa de gesso, OSB, lã mineral, membrana hidrófuga, aço, massa drywall, massa cola para placa cimentícia, cimento Portland, areia, fibra de vidro e placa cimentícia) se destacaram nas categorias de acidificações aquática e terrestre, aquecimento global e ecotoxicidades aquática e terrestre e eutrofização.



FONTE: A autora (2019).

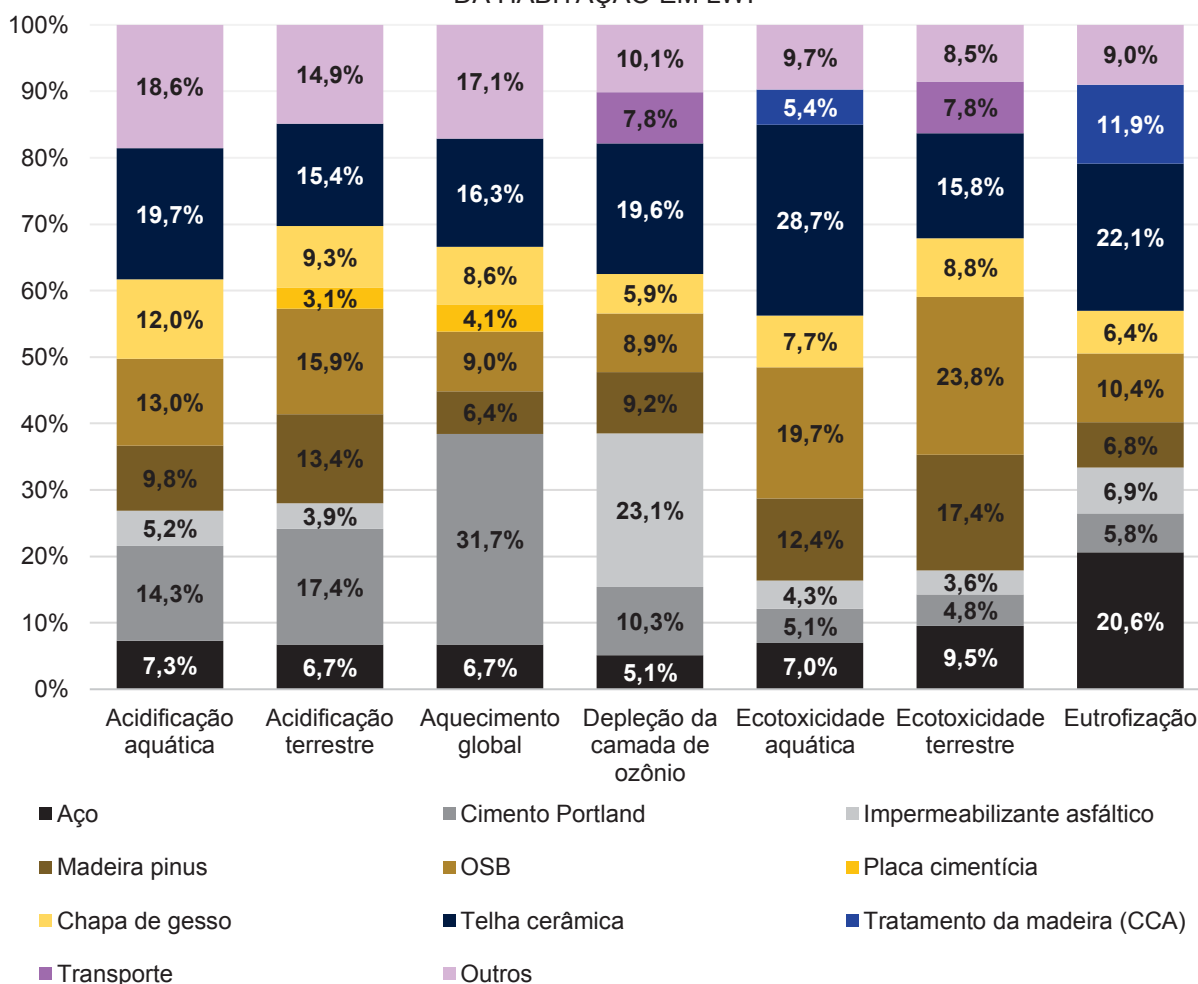
Em relação aos materiais utilizados na construção da habitação em LWF as maiores contribuições, levando em consideração todas as categorias, foram da telha cerâmica, do OSB, e do cimento Portland (GRÁFICO 5).

Na acidificação aquática, ecotoxicidade aquática e eutrofização a telha cerâmica foi o maior que mais contribuiu com emissões de SO₂ equivalente devido ao uso do dióxido de titânio na esmaltação. Na acidificação terrestre e no aquecimento global o impacto mais relevante foi proveniente do cimento Portland devido à produção do clínquer.

Já na depleção da camada de ozônio o impermeabilizante asfáltico foi responsável por um terço das contribuições devido ao processo de extração do petróleo e gás. Na ecotoxicidade terrestre o OSB respondeu pela maior participação,

e o processo mais relevante foi o tratamento das cinzas geradas na sua produção a fim de transformá-lo em fertilizante.

GRÁFICO 5 – IMPACTOS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO UTILIZADOS NA PRÉ-OPERAÇÃO DA HABITAÇÃO EM LWF



FONTE: A autora (2019).

Avaliando as contribuições dos materiais durante a pré-operação destacaram-se a telha cerâmica, o OSB e o cimento Portland. Já na operação foram os dois primeiros e a chapa de gesso.

No cenário final, o aterro sanitário gerou os maiores impactos na maioria das categorias (acidificação aquática, aquecimento global, ecotoxicidade aquática e eutrofização), onde foi encaminhado dos 23% resíduos gerados pela desconstrução, apenas menor do que a massa destinada ao aterro de inertes. Este, por outro lado, gerou os maiores impactos na acidificação terrestre e aquecimento global. Por fim, a

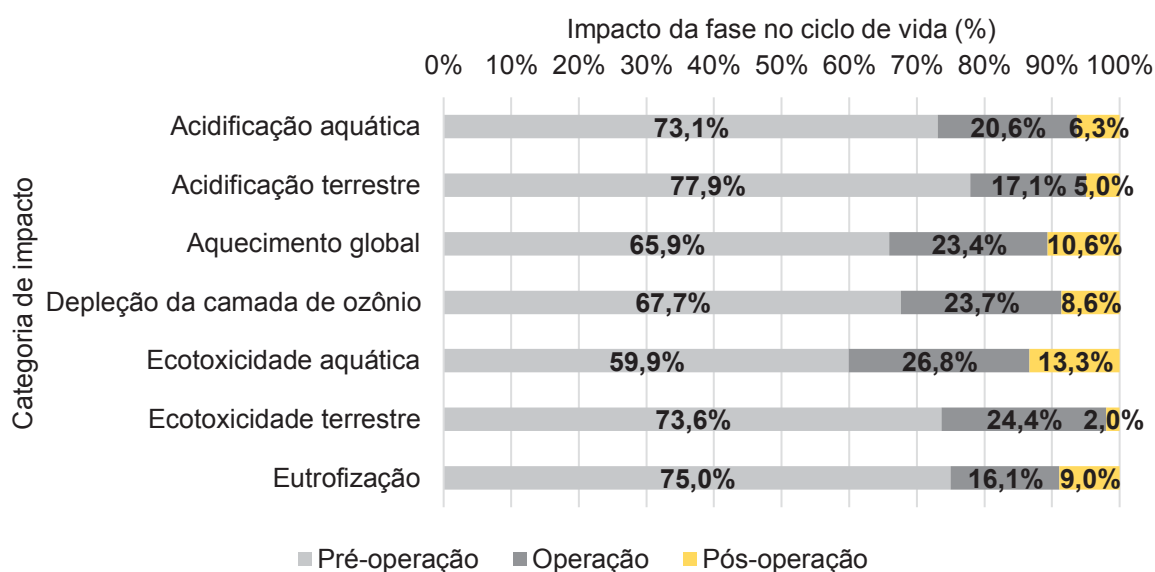
categoria de ecotoxicidade terrestre obteve a maior contribuição do aterro de resíduos perigosos, ainda que a sua massa correspondeu a 5% do total.

Comparando aos resultados encontrados em Monich (2012), que avaliou uma residência em LWF em termos de CO₂ emitidos, encontrou a telha, o aço, o gesso, o OSB e o concreto como os mais relevantes, verificou-se que os resultados são similares aos apresentados anteriormente para a categoria de aquecimento global (cimento, telha, OSB e chapa de gesso).

6.3 IMPACTOS DO SISTEMA EM *LIGHT STEEL FRAMING*

No são GRÁFICO 6 apresentadas as percentagens relativas à contribuição de cada fase do ciclo de vida da habitação em LSF.

GRÁFICO 6 – IMPACTOS DAS FASES DA ACV NA HABITAÇÃO EM LSF



FONTE: A autora (2019).

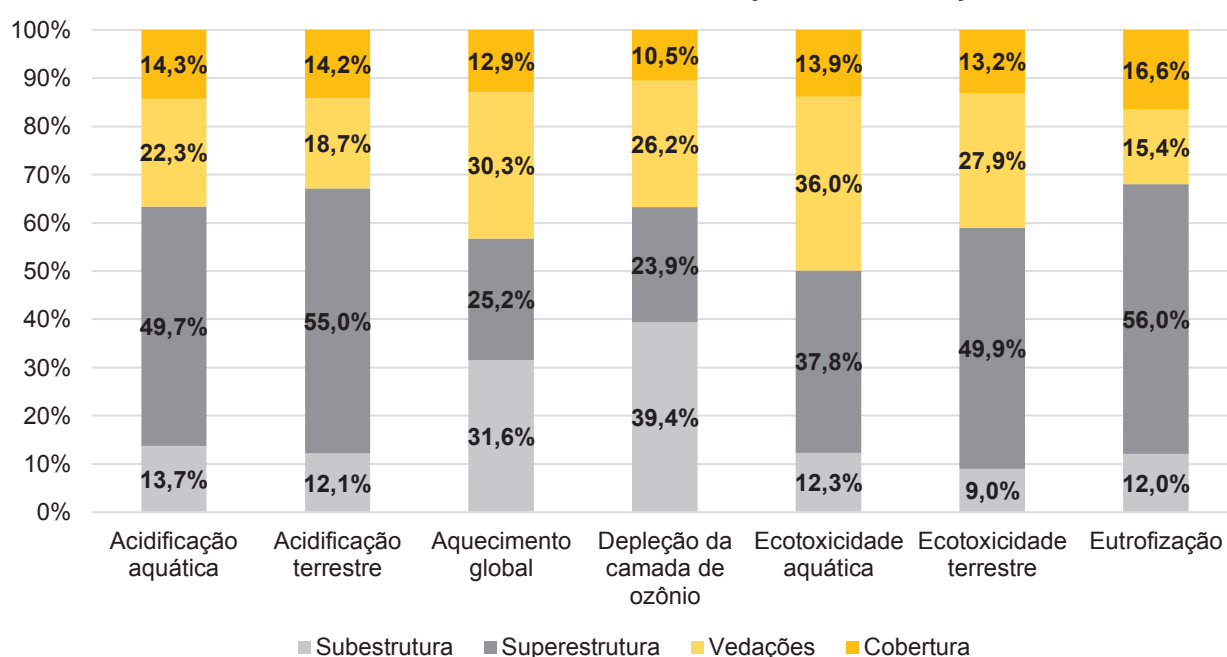
Assim como nos outros dois sistemas construtivos, no LSF a fase pré-operacional gerou os maiores impactos para todas as categorias, na sequência a operação e a pós-operação.

Foi também avaliada as quatro etapas da construção, que apresentaram as seguintes massas: subestrutura com 17.501,21 kg, superestrutura com 1.036,01 kg, vedações com 7.402,24 kg e cobertura com 978,12 kg. Na FIGURA 27 estão

representados nos gráficos as contribuições das quatro etapas para as categorias de impacto.

A subestrutura (aço areia, brita, cimento, forma e impermeabilizante asfáltico) foi a categoria que mais contribuiu para a depleção da camada de ozônio e o aquecimento global. A superestrutura foi responsável pela maioria dos impactos (acidificação aquática, acidificação terrestre, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre e eutrofização).

FIGURA 27 – IMPACTOS DAS ETAPAS DA CONSTRUÇÃO NA HABITAÇÃO EM LSF



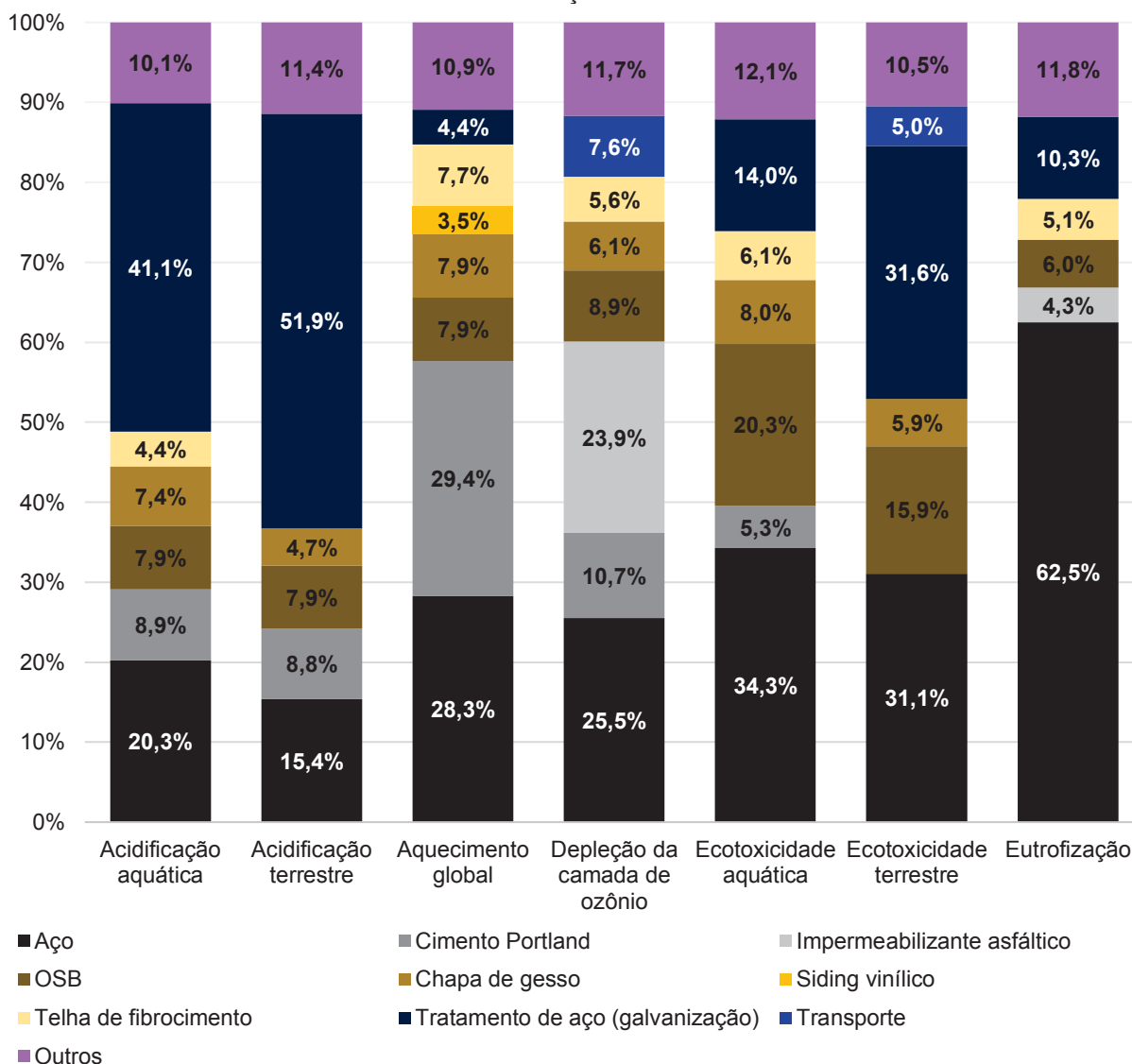
FONTE: A autora (2019).

A etapa de vedações e cobertura não apresentaram as maiores percentagens para nenhuma categoria.

A análise de impacto ambiental feita por material de construção utilizado na pré-operação da habitação em LSF está representada no GRÁFICO 7, onde observa-se que o aço e o seu tratamento, o OSB e o cimento Portland apresentaram as maiores participações.

A maior contribuição para a acidificação aquática, acidificação terrestre e ecotoxicidade terrestre foi proveniente do tratamento do aço. Na categoria de aquecimento global o material mais relevante foi o cimento Portland devido à produção do clínquer. Para a depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade aquática e eutrofização o aço teve a maior contribuição, devido à produção do ferro-gusa.

GRÁFICO 7 – IMPACTOS DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO UTILIZADOS NA PRÉ-OPERAÇÃO DA HABITAÇÃO EM LSF



FONTE: A autora (2019).

Analisando os impactos causados pelos materiais utilizados na operação, o OSB, a chapa de gesso e a telha de fibrocimento tiveram as maiores participações quanto aos impactos em estudo.

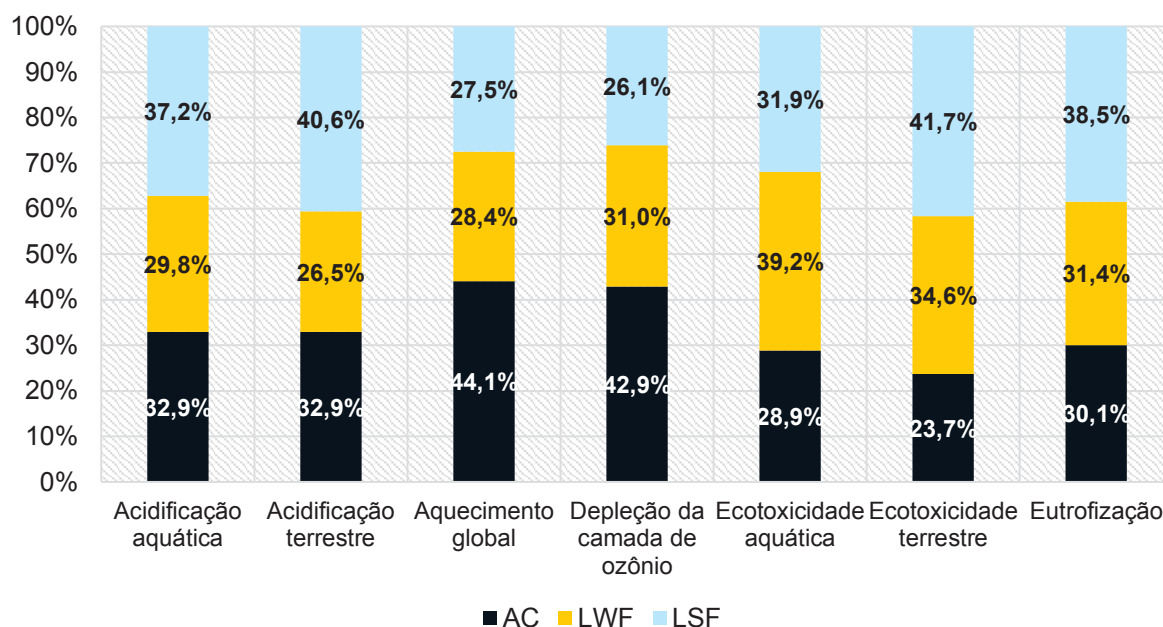
No cenário de disposição final dos resíduos o aterro sanitário apresentou os maiores valores de impacto para a acidificação aquática, aquecimento global, ecotoxicidade aquática e eutrofização. O aterro de inertes foi o destino que mais impactou na depleção da camada de ozônio e na ecotoxicidade terrestre foi o aterro de resíduos perigosos. Finalmente, na categoria de acidificação terrestre todos os destinos apresentaram contribuição similar.

Mass (2017) identificou em seu estudo que os materiais que mais impactaram em termos de emissão de CO₂ na pré-operação foram aço, cimento e brita, em que os dois primeiros também foram identificados dentre os principais neste trabalho.

6.4 COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Após avaliar cada sistema construtivo separadamente foi realizado um estudo comparativo dos impactos ambientais das habitações em AC, LWF e LSF, considerando o ciclo de vida completo (pré-operação, operação e pós-operação). O GRÁFICO 8 apresenta as contribuições dos sistemas para as categorias de impacto.

GRÁFICO 8 – COMPARATIVO ENTRE OS IMPACTOS DAS HABITAÇÕES EM AC, LWF E LSF



FONTE: A autora (2019).

Diante dos resultados apresentados, o sistema construtivo mais interessante ambientalmente foi o LWF, seguido pela AC e LSF. No entanto a diferença entre eles não foi discrepante, variando as participações de cada sistema entre 23,7% e 44,1%.

O LSF foi predominante na maior parte das categorias avaliadas: acidificação aquática, acidificação terrestre, ecotoxicidade terrestre e eutrofização devido à produção do aço tratado. A AC destacou-se pela maior participação nas categorias de aquecimento global e depleção da camada de ozônio devido ao uso do cimento Portland e de tijolos cerâmicos. Já o LWF foi o sistema que mais contribuiu para a

ecotoxicidade aquática, principalmente pelo uso das telhas cerâmicas, OSB, madeira pinus e do tratamento com CCA.

Quanto aos desperdícios de materiais ao longo do ciclo de vida, chegou a 38% para a AC, 28% para o LWF e 29% para o LSF. Ressalta-se que os coeficientes utilizados para chegar à quantidade de perdas de material foram extraídos da literatura e se tratam de uma estimativa dos desperdícios reais.

No item 2.3.6 do presente trabalho foram descritas pesquisas nacionais similares a este estudo (CALDAS, 2016; CALDAS, LIRA e SPOSTO, 2017; MASS, 2017; MONICH, 2012; NETO, 2011; PALACIO, 2013; PEDROSO, 2015). A unidade de medida comum dentre eles são as emissões de CO₂, que pode ser comparado ao aquecimento global, medido em kg de CO₂ equivalente. Todos eles encontraram valores inferiores para os sistemas alternativos (LSF e LWF) em comparação à AC, conforme também verificado neste estudo.

Comparando com os resultados de impactos ambientais encontrados na análise bibliométrica de Ramos, Santos e Maceno (2019) para as categorias de impacto analisadas na presente dissertação, verificou-se que de modo geral as construções pré-fabricadas contribuíram menos em termos de impactos ambientais, apenas apresentando valores maiores que a construção convencional nas categorias de acidificação aquática e eutrofização.

Em síntese, o material responsável pelos maiores impactos ambientais foi o aço, tanto devido à produção do ferro-gusa que é utilizado como matéria-prima como ao tratamento de zincagem. Esperava-se que a AC seria o sistema construtivo de maior impacto para todas as categorias, no entanto cabe ressaltar que diferentemente da madeira utilizada na estrutura do LWF e do concreto armado na AC, o aço é totalmente reciclável. Portanto o resultado apresentado se deu unicamente para o cenário adotado, em que não foi considerado o uso de aço reciclado.

6.5 COMPARAÇÃO DA BASE DE DADOS ADAPTADA E GENÉRICA

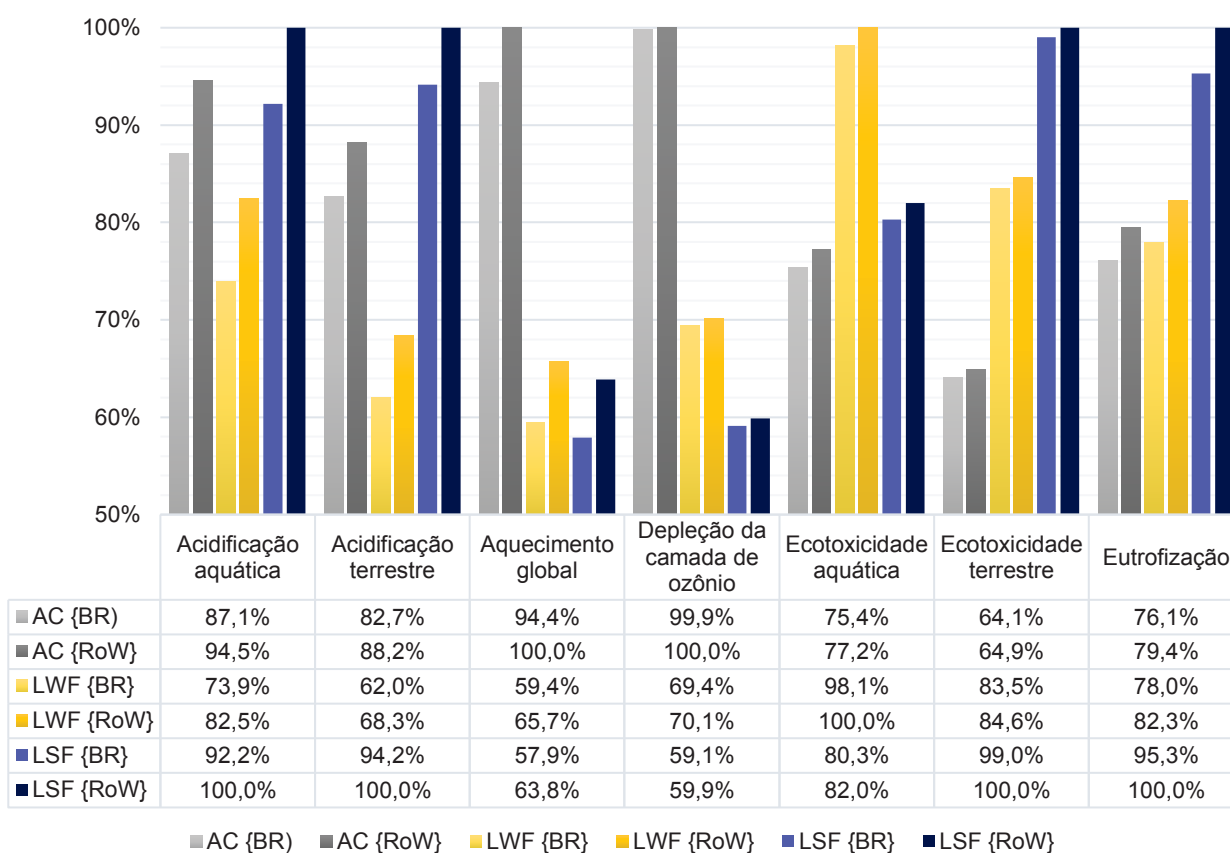
No GRÁFICO 9 foram chamados de genéricos os dados originais da base ({RoW}) e de adaptado ({BR}) os alterados, apresentados conforme os sistemas construtivos e as categorias de impacto.

Todos os resultados apresentados que tiveram a base de dados adaptada à realidade nacional obtiveram valores menores que os genéricos, conforme também

encontrado por Eicker et al. (2010), ainda que essa diferença tenha sido pequena (variou entre 0,1% e 8,6%).

De modo geral a influência da adaptação da base de dados foi menor para a AC, com variação média de 3,5%, e maior para o LWF com 4,2%. O LSF variou em 4,0%. Esses resultados podem ser justificados por se tratarem de métodos industrializados, que utilizam maiores quantidades de energia e são pré-fabricados.

GRÁFICO 9 – COMPARATIVO ENTRE A BASE DE DADOS GENÉRICA E A ADAPTADA



FONTE: A autora (2019).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desenvolver uma ACV requer dentre outros fatores a definição de critérios bem estabelecidos e imparcialidade. Especificamente à sua aplicação em uma edificação, existem inúmeros materiais que podem ser adotados e diferentes soluções construtivas.

Dessa forma a comparação entre ACVs realizadas em estudos isolados é complexa e seus resultados devem ser interpretados com cautela. Neste trabalho foram analisados os resultados de pesquisas anteriormente desenvolvidas apenas como forma de confirmar a coerência dos dados utilizados, evitando-se comparar valores ou escopos diferentes.

A decisão de utilizar dados teóricos a partir de uma base internacional se deu pela quantidade de informações a serem coletadas devido à grande variabilidade de materiais avaliados. As alterações realizadas na matriz de eletricidade de tornar os valores de impacto encontrados mais próximos à realidade, no entanto os resultados de uma ACV devem ser entendidos como uma estimativa e considerados dentro do seu contexto, de modo a auxiliar tomadas de decisão.

Todos os objetivos definidos para esta pesquisa foram atendidos integralmente. Para isso foi desenvolvida uma ACV que identificou os impactos ambientais (acidificação aquática, acidificação terrestre, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre e eutrofização) provenientes do ciclo de vida de HIS em AC, LWF e LSF. Os resultados foram então analisados e comparados entre si.

Dessa forma, o problema de pesquisa, que questionava como a aplicação da ferramenta ACV em uma habitação de interesse social (HIS) auxilia na comparação de impactos ambientais provenientes das fases pré-operacional, operacional e pós-operacional das construções em AC, LSF e LWF, foi respondida através da exposição de todo o desenvolvimento da ACV, com os critérios adotados e as limitações do estudo.

Quanto aos resultados acerca dos impactos ambientais observou-se ser importante priorizar critérios, já que não foi possível chegar a um único sistema construtivo que fosse o mais interessante para todas as categorias avaliadas.

Estudos anteriores de ACV concluíram que a alvenaria convencional apresentou maior participação nos impactos comparado a sistemas alternativos, a

partir da avaliação das emissões de CO₂. No entanto a presente pesquisa mostrou esta generalização pode ser equivocada, pois os resultados variaram de acordo com a categoria avaliada.

Nesse sentido, a AC pode ser interessante ambientalmente desde que adote o uso de cimentos mais sustentáveis e com a substituição da cerâmica vermelha. Outra questão são os elevados desperdícios de materiais que ocorrem na AC, de modo que focar na redução dessas perdas pode ser uma estratégia a fim de reduzir as cargas ambientais.

Com relação ao sistema em LSF, que foi o sistema que apresentou as maiores contribuições em geral para categorias em estudo, uma solução para reduzir os impactos seria a utilização de aço reciclado, formas alternativas para produção do OSB, com o uso de energia proveniente de fontes renováveis.

Já o LWF apresentou-se em geral como o mais sustentável ambientalmente, considerando as limitações e critérios adotados na ACV. O uso desse sistema no Brasil ainda é escasso e espera-se que com a emissão do DATec e a possibilidade de financiar construções para o programa Minha Casa Minha Vida pela CEF, aumente a oferta de imóveis na categoria de maior déficit no país. Isso pode levar a uma solução interessante tanto no âmbito ambiental (no contexto deste trabalho) como social.

Com a adaptação da base de dados para a matriz de eletricidade nacional comprovou-se que a matriz energética nacional pode ser considerada mais sustentável que a média mundial, no entanto o governo brasileiro deve investir em formas limpas de geração de energia para manter e melhorar o atual desempenho.

Por se tratar de um estudo teórico, foram encontradas barreiras como a indisponibilidade de dados sobre o consumo de energia na fabricação de habitações. Isso levou à delimitação da avaliação somente aos materiais de construção, que podem ser encontrados em bases de dados. No entanto outra dificuldade enfrentada foi a falta de materiais iguais ou equivalentes, portanto foram adotados materiais de composição similar.

A investigação realizada para o estudo de caso desta dissertação contribui para o cenário ainda incipiente de ACVs nacionais na área da construção civil, quando comparado a países como China e Estados Unidos. A preocupação ambiental tem se tornado cada vez mais popular, atingindo hoje o mercado da construção e servindo como um atrativo de vendas de novos imóveis. Este estudo de ACV oferece um

panorama geral sobre as características ambientais dos materiais empregados e sobre as etapas da construção mais relevantes ambientalmente.

A fim de dar continuidade a esta dissertação e suprir as limitações encontradas ao longo do seu desenvolvimento foram sugeridas pesquisas futuras:

- Substituir os materiais que tiveram as maiores contribuições aos impactos ambientais e refazer o estudo de ACV;
- Realizar um estudo de campo com coleta de dados primários sobre o consumo energético no canteiro de obras dos três sistemas construtivos;
- Substituir por aço reciclado a presente ACV e comparar com os resultados deste estudo;
- Realizar outras adaptações aos dados extraídos de uma base, como a origem da água consumida e modais de transporte;
- Desenvolver outras soluções estruturais para a habitação em LWF e LSF e avaliar a influência nos impactos ambientais;
- Realizar avaliação econômica e conforto ambiental das habitações estudadas;
- Analisar a sensibilidade dos dados da ACV;
- Realizar a ACV social em sistemas construtivos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8545**: execução de alvenaria sem função estrutural de tijolos e blocos cerâmicos. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 10157**: Aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7190**: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 15113**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004b.

_____. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

_____. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

_____. **NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15253**: Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações — Requisitos gerais, Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON). **Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002 e ABNT 10004/2004, Classificação resíduos sólidos**. 2017.

AGOPYAN, V. **Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras**. PCC-USP/FINEP/ITQC, 1998. Disponível em: <<http://perdas.pcc.usp.br>>. Acesso em: 16 out. 2018.

ALVES-MAZZOTTI, A. J. Usos e abusos dos estudos de caso. **Cadernos de Pesquisa**, v. 36, n. 129, p. 637–651, set./dez. 2006.

ARNOLD, C. **Timber Construction**. Building Systems Development, 2011. Disponível em: <https://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/08/Type_Timber.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Mãos à obra pro: o guia do profissional da construção**. São Paulo: Alaúde Editorial, 2013.

AUSTRALIAN CONSTRUCTION INDUSTRY FORUM. **Industry Structure and Capacity**. Disponível em: <<https://www.acif.com.au/forecasts/summary>>. Acesso em: 25 jan. 2019.

AZEREDO, H. A. DE. **O edifício até sua cobertura**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1997.

AZEVEDO, L. B. et al. Global assessment of the effects of terrestrial acidification on plant species richness. **Environmental Pollution**, v. 174, p. 10–15, 2013.

BARBOZA, M. R.; BASTOS, P. S. Traços De Concreto Para Obras De Pequeno Porte. **Concreto & Construções**, Curitiba, v. 36, p. 32–36, 2008.

BARROS, C. P. G. DE; COSTA, S. B.; OITICICA, M. L. G. R. Avaliação do desempenho acústico de partições verticais em construção seca na cidade de Maceió-AL. In: XIII ENCONTRO NACIONAL E IX ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Campinas: ANTAC, 2015. p.1–10.

BEAUD, M. **Arte da Tese: como preparar e redigir uma tese de mestrado, uma monografia ou qualquer outro trabalho universitário**. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

BEVILAQUA, R. **Estudo comparativo do desempenho estrutural de prédios estruturados em perfis formados a frio segundo os sistemas aporticados e “light steel framing”**. 247 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

BORGES, A. DE C. **Prática das pequenas construções**. 9 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2009.

BORGES, M. E. **Gerenciamento de Limpeza Urbana**. Viçosa: CTP, 1999.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Secretaria de recursos hídricos e ambiente urbano. **Manual para implantação de sistema de gestão de resíduos de construção civil em consórcios públicos**. Projeto internacional de cooperação técnica para a melhoria da gestão ambiental urbana no Brasil, Brasília, DF, nov. de 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat – PBQP-H, Brasília, DF, ago. de 2012.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat - PBQP-H – 29ª Reunião da CN-SiNAT**, 6 dez. 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais - SiNAT**. Brasília, DF, nov. de 2016.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Sistema Nacional de Avaliações Técnicas - SiNAT**. Disponível em: <http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_sinat.php>. Acesso em: 10 dez. 2018.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformado a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Steel Framing”)**. Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais - SiNAT. Brasília, DF, 2016.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Sistema estruturado em peças leves de madeira serrada – Tecverde (tipo *light wood framing*)**. Sistema Nacional de Avaliação Técnica de Produtos Inovadores e Sistemas Convencionais – SiNAT – DATec Nº 020-C. Brasília, DF, 2018.

CALDAS, L. R. **Avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO₂ de uma edificação habitacional unifamiliar de light steel framing**. 174 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

CALDAS, L. R. et al. Life cycle carbon emissions inventory of brick masonry and light steel framing houses in Brasilia: proposal of design guidelines for low-carbon social housing. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 71–85, 2017.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Participação (%) no Valor Adicionado Bruto (a preços básicos) - Segundo as Classes e Atividades**. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/media/anexos/tabela_02.D.05_6.xlsx>. Acesso em: 15 jul. 2017.

CAMPESTRINI, T. F. et al. **Entendendo BIM: uma visão do projeto de construção sob o foco de informação**. 1 ed., 2015.

CAMPOS, H. C.; SOUZA, H. A. DE. Avaliação pós-ocupação de edificações estruturadas em aço, focando edificações em light steel framing. CONSTRUMETAL - CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA. **Anais...** São Paulo, 2010. p.1–17.

CARAFÉR METAIS. **Divisão Ferro e Aço**. Disponível em: <<http://www.carafer.com.br/>>. Acesso em: 23 fev. 2019.

CARREIRA, D.; RE’EM, A.; TARIN, M. **Natural Capital Risk Exposure of the Financial Sector in Brazil**. Trucost, 2015. Relatório.

CASTRO, A. L. et al. Análise da viabilidade técnica da adaptação de dados internacionais de inventário de ciclo de vida para o contexto brasileiro: um estudo de caso do concreto para paredes moldadas no local. In: 57º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, **Anais...** Bonito, 2015. p. 1–16.

CAVALETT, O. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 647–658, 2013.

CAVANAGH, T. Balloon Houses: The Original Aspects of Conventional Wood-Frame Construction. **Journal of Architectural Education**, v. 51, n. 1, p. 5–15, 1997.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CEF). **Cadernos CAIXA Projeto Padrão Casas Populares**. Vitória, 2007. Disponível em: < <https://abenc-ba.org.br/wp-content/uploads/2017/04/Modelo-Padr%C3%A3o-de-Casa.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1997.

CIB. **Agenda 21 on sustainable construction**. CIB Report Publication 237, 1999.

CURRAN, M. A. Report on Activity of Task Force 1 in the Life Cycle Inventory Programme: Data Registry – Global Life Cycle Inventory Data Resources. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, p. 284–289, 2006.

EL DEBS, M. K. **Concreto Pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

DGBN. **Building life cycle assessment**. Stuttgart, 2018. Disponível em: < https://static.dgnb.de/fileadmin/en/dgnb_system/system/version2018/02_ENV1.1_Building-life-cycle-assessment.pdf?m=1530286752&>. Acesso em: 30 jul 2018.

DIAS, G. L. **Estudo experimental de paredes estruturais de sistema leve em madeira (Sistema Plataforma) submetidas a força horizontal no seu plano**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

DREHER, B. A. **Iniciativas de reprojeto de produto visando a redução de impactos ambientais - um estudo de caso na indústria moveleira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; JÚNIOR, J. A. V. A. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ECOINVENT. **Geographies names coordintes shortcuts overlaps**, 2015. Disponível em: <https://www.ecoinvent.org/files/eiv3.2_geographies-names_coordinates_shortcuts_overlaps.xlsx>. Acesso em: 30 abr. 2018.

ECOINVENT. **History**. Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/about/history/history.html>>. Acesso em: 1 jul. 2017a.

ECOINVENT. **Allocation cut-off by classification**. Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html>>. Acesso em: 11 dez. 2018b.

EICKER, M. O. DE et al. The applicability of non-local LCI data for LCA. **Environmental IMPACT Assessment Review**, v. 30, n. 3, p. 192–199, 2010.

ESPÍNDOLA, L. DA R. **O wood frame na produção de habitação social no Brasil**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

ESPINDOLA, L. DA R.; INO, A. Inserção e financiamento do sistema wood frame no programa habitacional Minha Casa Minha Vida. XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Maceió, 2014. p.1578–1587.

EVANGELISTA, P. P. A. et al. Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 748–761, 2018.

FERRY, S. Steel framing in the residential market. **Construction Dimensions**, jul. 1999.

FILHO, B. L. Seqüência básica na elaboração de protocolos de pesquisa. **Arquivos Brasileiros de Cardiologia**, v. 71, p.735–740, 1998. São Paulo.

FILHO, O. C.; JUNIOR, N. L. S.; LUEDEMANN, G. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **A Avaliação de Ciclo de Vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Brasília, 2016.

FILHO, R. J. DE A. T. **Análise térmica de estruturas de aço utilizadas no sistema light steel framing**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

FIRJAN. **Construção civil - Desafios 2020**. Rio de Janeiro: Sistema Firjan, 2014.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook - wood as an engineering material**. Centennial Edition. Madison: USDA, 2010.

FORMOSO, C. T. et al. **As perdas na construção civil: conceitos, classificações e seu papel na melhoria do setor**. Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. **Déficit habitacional no Brasil - 2015**. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <<http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/direi-2018/estatistica-e-informacoes/797-6-serie-estatistica-e-informacoes-deficit-habitacional-no-brasil-2015/file>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

GERDAU. **Vergalhão Gerdau GG 50**. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt/produtos/vergalhao-gerdau-gg-50>>. Acesso em: 16 out. 2018.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2009.

GOODIER, C.; GIBB, A. Future opportunities for offsite in the UK. **Construction Management and Economics**, v. 25, n. 6, p. 585–595, 2007.

GOUVEIA, F. N. **Produção de chapas de partículas orientadas (OSB) a partir das espécies *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Pinus elliottii* Engelm.** Tese (Doutorado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

GUARDIGLI, L. Comparing the environmental impact of reinforced concrete and wooden structures. In: PACHECO, F. **Eco-efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2014. p.407-433.

GUINÉE, J. B. et al. **Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards**. 2001. Relatório final.

GYURU, E. **Barras de ferro 3/8**. Disponível em: <<http://tijolosnojambeiro.blogspot.com/2010/03/barras-de-ferro-38-24032010.html>>. Acesso em: 7 dez. 2018.

HANNAN, K. D.; RUMMER, J. L. Aquatic acidification: a mechanism underpinning maintained oxygen transport and performance in fish experiencing elevated carbon dioxide conditions. **Journal of Experimental Biology**, 221, 2018.

HEIJUNGS, R. et al. **Environmental life cycle assessment of products**. Leiden: Centre of Environmental Science, 1992.

HOGAN, D. J. **Dinâmica populacional e mudança ambiental: cenários para o desenvolvimento brasileiro**. 1 ed. Campinas: Núcleo de Estudos de População-Nepo/Unicamp, 2007.

HORVATH, A. Construction Materials and the Environment. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 29, n. 1, p. 181–204, 2004.

INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY (IES). **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Analysing of existing Environmental IMPACT Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment**. 1 ed. Ispra: Joint Research Centre - European Commission, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Domicílios particulares permanentes, por tipo de material das paredes externas, número de cômodos e número de dormitórios - Resultados Gerais da Amostra**, 2010. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1617>>. Acesso em: 5 mai. 2018.

INSTITUTO GEA. **Reciclagem**. Disponível em: <<http://www.institutogea.org.br/reciclagem/lista-de-sucateiros-quem-compra-materiais-reciclaveis/>>. Acesso em: 23 fev. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Avaliação do Ciclo de Vida na Indústria de Construção Civil**. Governo do Estado de São Paulo, 2018.

ISO 14049/TR. **Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis**. 2012. Relatório técnico.

IWAKIRI, S.; PRATA, J. G. Produção de painéis compensados multilaminados de Eucalyptus. **Revista da Madeira**, n. 111, 2008.

JACKSON, A. A. The Development of Steel Framed Buildings in Britain 1880-1905. **Construction History**. Berkshire, v. 14, 1998.

JAILLON, L.; POON, C. S.; CHIANG, Y. H. Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 309–320, 2009.

JOLLIET, O. et al. IMPACT 2002 +: a new life cycle assessment methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, p. 324–330, nov. 2003.

JUNIOR, C. C.; MOLINA, J. C. **Coberturas em estruturas de madeira: exemplos de cálculo**. São Paulo: Pini, 2010.

JUNIOR, M. I. M.; ROCHA, M. P. DA; TRUGILHO, P. F. Estimativa do Rendimento em Madeira Serrada de Pinus para Duas Metodologias de Desdobro. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 4, p. 556–563, 2013.

KIM, T. H.; CHAE, C. U. Environmental impact analysis of acidification and eutrophication due to emissions from the production of concrete. **Sustainability**, v. 8, n. 6, p. 1–20, 2016.

KOCHE, J. C. **Fundamentos da Metodologia Científica**. Petrópolis: Editora Vozes, 2002.

KOLB, J. **Systems in timber Engineering - Loadbearing Structures and Component layers**. Munique: Schweiz, Lignum — Holzwirtschaft Research, ZurichDGfH — German Society for Wood Research, 2008.

LAROCA, C. **Habitação social em madeira: uma alternativa viável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

LIRA, J. S. DE M. M. **Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LIU, Y. et al. Assessing Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Material for Mid-Rise Residential Buildings in Cold Regions in China-A Life-Cycle Assessment Approach. **Sustainability**, v. 8, n. 10, 2016.

LOPES, J. Construction in the economy and its role in socio-economic development. In: OFORI, G. **New Perspectives on Construction in Developing Countries.** Abingdon: Taylor & Francis, 2011. p.40–71.

MAO, C. et al. Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 165–176, 2013.

MAODUS, N. et al. Life cycle and energy performance assessment of three wall types in south-eastern Europe region. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 605–614, 2016.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica.** 7 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARTINS, J. F. A. **Análise do desempenho térmico de placas à base de óxido de magnésio aplicadas no sistema light steel frame.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

MASS, B. H. **Resíduos de construção civil na obra de uma edificação e seus impactos: estudo de caso de uma residência em light steel framing e simulação de uma em alvenaria.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de IMPACTo do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160–175, 2016.

MENDES, S. P. B. **Isolamento acústico aéreo em campo de partições verticais em Light Steel Framing, em habitações unifamiliares.** Mestrado (Dissertação em Arquitetura e Urbanismo) Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

MENEGUCI, M. Indústria e construção. **Vitrine da Conjuntura**, v. 11, n. 8, p. 2018–2019, 2018.

MERLIN, A. J. et al. Análise do Efeito da Protensão em Lajes Pré-moldadas com Armação Trelaçada. 1º ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO. **Anais...** São Carlos, 2005.

MIETTINEN, P.; HÄMÄLÄINEN, R. P. How to benefit from decision analysis in environmental life cycle assessment (LCA). **European Journal of Operational Research**, v. 102, n. 2, p. 279–294, 1997.

MITIDIERI, C. Inovações e SiNAT. **Revista Notícias da Construção**, p. 44-45, dez. 2011.

MOLINA, J. C.; JUNIOR, C. C. Sistema construtivo em “wood frame” para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 31, n. 2, p. 143, 2010.

MONAHAN, J.; POWELL, J. C. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 1, p. 179–188, 2011.

MONICH, C. R. **Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema wood frame no estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MONTEYNE, D. Framing the American dream. **Journal of Architectural Education**, v. 58, n. 1, p. 24–33, 2004.

MORAES, P. T. A.; LIMA, M. G. Levantamento e análise de processos construtivos industrializados sob a ótica da sustentabilidade e desempenho . XV ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA. **Anais...** São José dos Campos, 2009.

MOTUZIENĖ, V. et al. Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 532–541, 2016.

MOURA, A.; SÁ, M. DAS V. V. A. DE. Racionalização E Industrialização Na Construção Sustentável. **Revista Tecnologia & Informação**, p. 64–77, 2014.

MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; VILHENA, A. **Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações**. Campinas: CETEA/CEMPRE, 2002.

MUZZI, T. A. **Métodos de avaliação da resistência e transmitância térmicas do sistema de fechamento em Light Steel Framing**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

NETO, A. C. N. **Energia incorporada e emissões de CO2 de fachadas. Estudo de caso do steel frame para utilização em Brasília**. Mestrado (Dissertação em Estruturas e Construção Civil) Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

NETO, M. F. H. **Estudo de viabilidade técnico/econômica da casa de madeira popular no estado do Paraná**. Mestrado (Dissertação em Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

NEW ZEALAND GREEN BUILDING COUNCIL. **Green Star**, Manual v3.1. 2016. Manual técnico.

NUNES, C. C.; JUNGES, E. Comparação de custo entre estrutura convencional em concreto armado e alvenaria estrutural de blocos de concreto para edifício residencial

em Cuiabá-MT. XII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Fortaleza, 2008.

OBA, M. M. **O projeto de readequação visando a construção mais sustentável no edifício moderno: Estudo de caso sobre o centro politécnico da UFPR**. Mestrado (Dissertação em Engenharia de Construção Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PAJCHROWSKI, G. et al. Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 428–436, 2014.

PALACIO, C. D. U. **Energia incorporada de vedações para habitação de interesse social considerando-se o desempenho térmico. Estudo de caso com utilização do light steel frame no entorno do DF**. Mestrado (Dissertação em Construção Civil) Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

PEDROSO, G. M. **Avaliação de ciclo de vida energético (ACVE) de sistemas de vedação de habitações**. Tese (Doutorado em Construção Civil) Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

PEREIRA, R. S. Poluição hídrica: causas e consequências. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 1, p. 20–36, 2004.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PICARELLI, M. **Habitação: uma interrogação**. São Paulo: FAUUSP, 1986.

PILOTTO, G. A.; VALLE, T. R. DO. **Comparativo De Custos De Sistemas Construtivos, Alvenaria Estrutural E Estrutura Em Concreto Armado No Caso Do Empreendimento Piazza Maggiore**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PINI. **TCPO - Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos**. 13 ed. São Paulo: Pini, 2008.

PLESSIS, C. DU. **Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries**. Pretoria: Programme for Sustainable Human Settlements, CSIR Building and Construction, 2002.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). **Acompanhando a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**: subsídios iniciais do Sistema das Nações Unidas no Brasil sobre a identificação de indicadores nacionais referentes aos objetivos de desenvolvimento sustentável. Brasília: PNUD, 2015.

PRÉ. **Introduction to LCA with SimaPro**. São Francisco, 2016.

RADAVELLI, G. F. **Avaliação experimental da perda de transmissão sonora em paredes externas de light steel frame**. Mestrado (Dissertação em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

RAMOS, V. M. K.; SANTOS, A. D. P. L.; MACENO, M. Análise bibliométrica de estudos comparativos entre a construção convencional e a pré-fabricada por meio da ACV. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 8, n. 1, p. 81-99, jan./abr., 2019.

RODRIGUES, F. C. **Tabelas de dimensionamento estrutural para edificações com o sistema construtivo em steel framing**. Belo Horizonte: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2010.

RODRIGUES, F. C.; CALDAS, R. B. **Steel Framing: engenharia**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2016.

SACCO, M. DE F. Light wood frame - construções com estrutura leve de madeira. **Téchne**, n. 140, 2008.

SANTIAGO, C. C. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007.

SANTOS, J. P. T. DOS et al. Classificação de resíduos de madeira tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA) segundo ensaios de lixiviação. XII Salão de Iniciação Científica da PUCRS. **Anais...** Porto Alegre, 2011. p. 9–11.

SEV, A. How can the construction industry contribute to sustainable development? A conceptual framework. **Sustainable Development**, v. 17, n. 3, p. 161–173, 2009.

SILVA, D. A. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. Mestrado (Dissertação em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

SILVA, G. A. DA et al. **Avaliação do ciclo de vida: ontologia terminológica**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2014.

SILVA, J. DE C. Madeira preservada – Os impactos ambientais. **Revista da Madeira**, n. 100, 2006.

SILVA, L. G. Z. DA; SPERANDIO, D. Sustentabilidade na construção civil: comparativo de custos entre o sistema de alvenaria convencional e wood frame como forma de redução do déficit habitacional no município de Frederico Westphalen/RS. **Revista GEDECON**, v. 6, n. 1, p. 219–234, 2018.

SILVEIRA, D. T.; GERHARDT, T. E. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

SOARES, S.; SOUZA, D.; PEREIRA, S. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. In: M. A. SATTler; F. O. R. PEREIRA. **Coletânea Habitar**. Porto Alegre, ANTAC, v. 7, 2006. p.96–127.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. D. P. L. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 309–326, 2018.

SOUZA, D. M. DE et al. Life cycle thinking in Brazil: challenges and advances towards a more comprehensive practice. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 3, p. 462–465, 2017.

STRANDDORF, H. F.; HOFFMANN, L.; SCHMIDT, A. **IMPACT categories, normalisation and weighting in LCA**. Danish Ministry of the Environment – Environmental Protection Agency, Environmental News, n. 78, 2005.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TECVERDE. **Panorama do sistema construtivo Tecverde**. Curitiba, 2016. Relatório.

THALLON, R. **Graphic guide to Frame Construction**. 3 ed. Newtown: The Taunton Press, 2008.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Life Cycle Assessment: Principles and Practice**. Cincinnati, 2006. Relatório.

UGAYA, C. M. L. Avaliação do ciclo de vida de produtos. In: P. J. ADISSI; F. A. PINHEIRO; R. DA S. CARDOSO; ET AL. **Gestão Ambiental de Unidades Produtivas**. 1 ed., Elsevier, 2012. p.275–298.

UNEP. **Life Cycle Assessment: What it is and how to do it**. 1 ed. Paris: United Nations Environmental Programme – Industry and Environment, 1996.

UNEP. **Buildings and Climate Change: Summary for Decision-Makers**. Paris: UNEP SBCI, 2009.

UNEP. **Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases - Basis for Greener Processes and Products**. Paris: Imprimerie Escourbiac, 2011.

USP/EESC. **Lajes maciças**. Disponível em: <<http://www.gdace.uem.br/romel/MDidatico/EstruturasConcretoll/>>. Acesso em: 16 out. 2018.

VASQUES, C. C. P. C. F.; PIZZO, L. M. B. F. Comparativo de sistemas construtivos, convencional e wood frame em residências unifamiliares. **Cognitio**, São Paulo, 2014.

VEDACIT. **Produtos - Bianco**. Disponível em: <<http://vedacit.com.br/produtos/bianco>>. Acesso em: 16 out. 2018.

VERONES, F. et al. **LC-Impact Version 0.5 - A spatially differentiated life cycle impact assessment approach**. 2010.

VITOR, R. O. **Modelagem Numérica de Diagonais Equivalentes em Painéis de Cisalhamento do Sistema Light Steel Framing**. Mestrado (Dissertação em Engenharia de Estruturas) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Ficha de informação de segurança de produto químico**. Curitiba, 2014. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2017/06/FispqCalHidratadaItau.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2014.

WEIDEMA, P. B.; WESNÆS, M. S. Data quality management for life cycle inventories - an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, p. 167–174, 1996.

WEIMER, B. F. **Avaliação da influência de furos na capacidade resistente de perfis usados no sistema construtivo Light Steel Framing**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M. Z.; ALTING, L. **Environmental Assessment of Products**. Volume 1 Methodology, Tools and Case Studies in Product Development. Springer US, 1997.

WGBC. **WorldGBC Annual Report 2015/2016**. 2016. Relatório.

WHITE, A. L.; SHAPIRO, K. Life Cycle Assessment: A second opinion. **Environmental Science and Technology**, v. 27, n. 6, 1993.

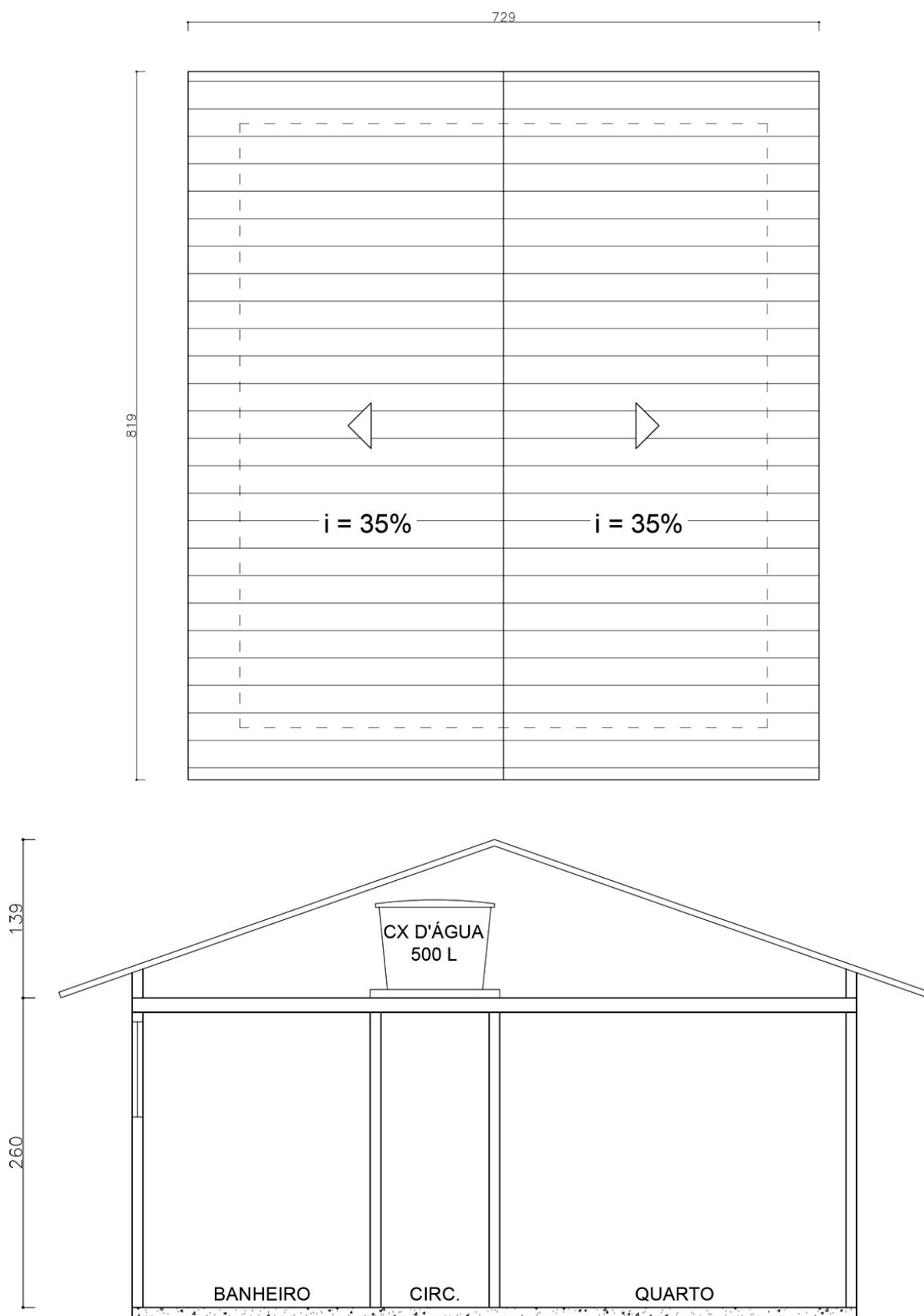
YAZIGI, W. **A técnica de edificar**. 10 ed. São Paulo: Pini, SindusCon, 2009.

YEHEYIS, M. et al. An overview of construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 15, n. 1, p. 81–91, 2013.

YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e Métodos**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZEMPULSKI, L. N.; ZEMPULSKI, M. F. S. **Dossiê técnico - Galvanização eletrolítica**. Instituto de Tecnologia do Paraná. 2007. Dossiê técnico.

ZOCHE, L. **Identificação das limitações da ACV sob a ótica de pesquisas acadêmicas**. Mestrado (Dissertação em Engenharia de Produção) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

APÊNDICE A – COBERTURA E CORTE DO ESTUDO DE CASO

APÊNDICE B – QUANTITATIVO PARA ALVENARIA CONVENCIONAL

ITEM	DESCRIÇÃO	QUANT.	UN.
1	SUBESTRUTURA - FUNDAÇÃO		
1.1	ESTACA EM CONCRETO, FCK = 25MPA (TRAÇO 1:2,1:2 - CIMENTO:AREIA:BRITA) - DIÂMETRO = 20 CM, 27 ESTACAS, PROFUNDIDADE = 250 CM, SEM ARMAÇÃO		
1.1.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32	866,89	KG
1.1.2	AREIA	3.011,88	KG
1.1.3	BRITA	2.787,26	KG
1.2	CAMADA DE BRITA, E = 3 CM	2.665,28	KG
1.3	FÔRMA PARA VIGA BALDRAME, CHAPA DE COMPENSADO, E=25 MM	409,86	KG
1.4	LASTRO DE CONCRETO MAGRO (TRAÇO 1:4,5:4,5 - CIMENTO:AREIA:BRITA) - E = 5 CM		
1.4.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32	649,35	KG
1.4.2	AREIA	4.266,54	KG
1.4.3	BRITA	2.921,41	KG
1.5	ARMAÇÃO DE VIGA BALDRAME EM CONCRETO ARMADO, AÇO CA-60 DE 5.0 MM	36,37	KG
1.6	ARMAÇÃO DE VIGA BALDRAME EM CONCRETO ARMADO E DE AMARRAÇÃO VIGA/ESTACA, AÇO CA-50 DE 6,3 MM	12,33	KG
1.6	ARMAÇÃO DE VIGA BALDRAME EM CONCRETO ARMADO, AÇO CA-50 DE 8,0 MM	18,42	KG
1.7	VIGA BALDRAME EM CONCRETO, FCK = 25MPA (TRAÇO 1:2,1:2 - CIMENTO:AREIA:BRITA)		
1.7.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32	494,65	KG
1.7.2	AREIA	1.718,58	KG
1.7.3	BRITA	1.590,41	KG
1.8	IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	178,02	KG
2	SUPERESTRUTURA - CONCRETO ARMADO		
2.1	FÔRMA PARA PILARETES, E=25 MM	327,32	KG
2.2	PILARETE EM CONCRETO, FCK = 25MPA (TRAÇO 1:2,1:2 - CIMENTO:AREIA:BRITA) - 0,14 M X 0,26 M, 9 PILARETES , H=250 CM		
2.2.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32	134,09	KG
2.2.2	AREIA	465,86	KG
2.2.3	BRITA	431,12	KG
2.3	ARMAÇÃO DE PILARETE EM CONCRETO ARMADO, AÇO CA-60 DE 5.0 MM	14,06	KG
2.4	ARMAÇÃO DE PILARETE EM CONCRETO ARMADO, AÇO CA-50 DE 10 MM	65,84	KG

continua

2.5	FÔRMA PARA CINTAS, CHAPA DE COMPENSADO, E=25 MM		601,13	KG
2.6	CINTA EM CONCRETO, FCK = 25MPA (TRAÇO 1:2,1:2 - CIMENTO:AREIA:BRITA) - 0,1 M X 0,15 M			
2.6.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32		264,90	KG
2.6.2	AREIA		920,36	KG
2.6.3	BRITA		851,72	KG
2.7	ARMAÇÃO DE PILARETE EM CONCRETO ARMADO, AÇO CA-60 DE 5.0 MM		112,86	KG
2.8	ARMAÇÃO DE PILARETE EM CONCRETO ARMADO, AÇO CA-50 DE 10 MM		121,55	KG
3	ESTRUTURAS PRÉ-MOLDADAS			
3.1	LAJE PRÉ-MOLDADA, E = 12 CM			
3.2	LAJOTA CERÂMICA		808,70	KG
3.3	ARMAÇÃO DE VIGOTA T PRÉ-MOLDADA, AÇO CA-60 DE 5.0 MM		8,11	KG
3.4	CAPA DE LAJE EM CONCRETO, FCK = 25MPA (TRAÇO 1:2,1:2 - CIMENTO:AREIA:BRITA)			
3.4.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32		1.027,09	KG
3.4.2	AREIA		3.568,45	KG
3.4.3	BRITA		3.302,33	KG
3.5	FÔRMA PARA LAJE, CHAPA DE COMPENSADO, E=25 MM		662,98	KG
3.6	VERGA E CONTRA VERGA PARA ESQUADRIAS			
3.7	ARMAÇÃO DE VERGA E CONTRA VERGA, AÇO CA-50 DE 6,3 MM		4,43	KG
3.8	CAPA DE LAJE EM CONCRETO, FCK = 25MPA (TRAÇO 1:2,7:3 - CIMENTO:AREIA:BRITA)			
3.8.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32		7,36	KG
3.8.2	AREIA		25,57	KG
3.8.3	BRITA		23,66	KG
3.9	ARGAMASSA (TRAÇO 1:2:8 - CIMENTO:CAL:AREIA) PARA VERGA			
3.9.1	AREIA		123,65	KG
3.9.2	CAL HIDRATADA		11,93	KG
3.9.3	CIMENTO PORTLAND CP II-32		10,96	KG
3.10	FÔRMA PARA VERGA, CHAPA DE COMPENSADO, E=25 MM		4.914,53	KG
4	VEDAÇÃO - ALVENARIA CERÂMICA			
4.1	ALVENARIA CERÂMICA DE 8 FUROS, E = 9 CM		13.213,25	KG
4.2	ARGAMASSA (TRAÇO 1:2:8 - CIMENTO:CAL:AREIA) PARA ASSENTAMENTO DE ALVENARIA DE VEDAÇÃO			
4.2.1	AREIA		2.574,98	KG
4.2.2	CAL HIDRATADA		248,41	KG
4.2.3	CIMENTO PORTLAND CP II-32		228,27	KG

continua

5	COBERTURA - TELHA CERÂMICA			
5.1	TELHAMENTO COM TELHA CERÂMICA		1.910,44	KG
5.2	PERFIL DE MADEIRA MACIÇA EM PINUS - ESTRUTURA COBERTURA		476,00	KG
5.3	TRATAMENTO DA MADEIRA		6,05	KG
6	REVESTIMENTOS INTERNOS			
6.1	CHAPISCO (TRAÇO 1:3 - CIMENTO:AREIA) - E = 0,5 CM			
6.1.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32		370,06	KG
6.1.2	AREIA		1.569,25	KG
6.2	EMBOÇO APLICADO MANUALMENTE (TRAÇO 1:2:8, CIMENTO:CAL:AREIA) - e = 2 CM			
6.2.1	AREIA		7.638,97	KG
6.2.2	CAL HIDRATADA		736,93	KG
6.2.3	CIMENTO PORTLAND CP II-32		677,20	KG
6.3	CONTRAPISO COM ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA (TRAÇO 1:4 - CIMENTO:AREIA) - E = 2 CM			
6.3.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32		490,16	KG
6.3.2	AREIA		2.761,65	KG
7	REVESTIMENTOS EXTERNOS			
7.1	CHAPISCO (TRAÇO 1:3 - CIMENTO:AREIA) - E = 0,5 CM			
7.1.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32		212,34	KG
7.1.2	AREIA		900,43	KG
7.2	EMBOÇO APLICADO MANUALMENTE (TRAÇO 1:2:8, CIMENTO:CAL:AREIA) - e = 2 CM			
7.2.1	AREIA		4.383,22	KG
7.2.2	CAL HIDRATADA		422,85	KG
7.2.3	CIMENTO PORTLAND CP II-32		388,58	KG

APÊNDICE C – QUANTITATIVO PARA LIGHT WOOD FRAMING

ITEM	DESCRIÇÃO	QUANT.	UN.
1	SUBESTRUTURA - FUNDAÇÃO		
1.1	CAMADA DE BRITA, E = 5 CM	1.328,25	KG
1.2	FÔRMA PARA RADIER, CHAPA DE COMPENSADO, E=25 MM	698,28	KG
1.3	RADIER EM CONCRETO, FCK = 30MPA (TRAÇO 1:2,1:2,5 - CIMENTO:AREIA:BRITA)		
1.3.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32	2.302,08	KG
1.3.2	AREIA	7.062,93	KG
1.3.	BRITA	5.753,29	KG
1.4	ARMAÇÃO DE RADIER, AÇO EM TELA SOLDADA	66,59	KG
1.5	IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	289,80	KG
2	SUPERESTRUTURA - LIGHT WOOD FRAMING		
2.1	PREGO PARA ESTRUTURA	0,74	KG
2.2	PERFIL DE MADEIRA MACIÇA EM PINUS	1.916,38	KG
2.3	TRATAMENTO DA MADEIRA	16,66	KG
2.4	CHUMBADOR CB 5/16"X100MM COM PRISIONEIRO E PROLONGADO	157,29	KG
3	PAREDES E PAINÉIS		
3.1	CHAPA DE GESSO - 12,5 MM X 1200 MM X 1800 MM	1.879,61	KG
3.2	LÃ MINERAL - 12500 MM X 1200 MM X 50 MM (15M2/ROLO)	45,80	KG
3.3	MEMBRANA HIDRÓFUGA (POLIPROPILENO)	9,50	KG
3.4	PLACA CIMENTÍCIA - 10 MM X 1200 MM X 2400 MM	1.273,46	KG
3.5	OSB - 11,1 MM X 1200 MM X 2400 MM	1.886,15	KG
3.6	PARAFUSO 3,5X25MM	0,63	KG
3.7	PARAFUSO 4,2X13MM	0,83	KG
3.8	PARAFUSO 4,5X45MM CHIPBOARD	0,62	KG
3.9	PARAFUSO 4,2X19MM	3,51	KG
3.10	PARAFUSO 4,2X32MM	4,81	KG
3.11	GRAMPO PARA MEMBRANA	10,59	KG
3.12	CANTONEIRA 25X30X3000MM PERFURADA	1,34	KG
3.13	CANTONEIRA 25X30X3000MM	12,92	KG
4	COBERTURA E PROTEÇÕES		

continua

4.1	TELHAMENTO COM TELHA CERÂMICA		1.910,44	KG
5	REVESTIMENTOS INTERNOS			
5.1	MASSA DRYWALL		125,43	KG
5.2	CONTRAPISO COM ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA (TRAÇO 1:4 - CIMENTO:AREIA) - E = 2 CM			
5.2.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32		490,16	KG
5.2.2	AREIA		2.761,65	KG
5.3	FITA DE JUNTA DE CHAPA DE GESSO (50mm x 50m)		8,40	KG
6	REVESTIMENTOS EXTERNOS			
6.1	TELA DE FIBRA DE VIDRO (50m x 1m)		16,05	KG
6.2	MASSA COLA PARA PLACA CIMENTÍCIA		271,20	KG
6.3	FITA DE JUNTA DE PLACA CIMENTÍCIA (50mm x 50m)		4,80	KG
6.4	PARAFUSO PONTA BROCA 4,2X32MM		3,59	KG

APÊNDICE D – QUANTITATIVO PARA LIGHT STEEL FRAMING

ITEM	DESCRIÇÃO	QUANT.	UN.
1	SUBESTRUTURA - FUNDAÇÃO		
1.1	CAMADA DE BRITA, E = 5 CM	1328,25	KG
1.2	FÔRMA PARA RADIER, CHAPA DE COMPENSADO, E=25 MM	698,28	KG
1.3	RADIER EM CONCRETO, FCK = 30MPA (TRAÇO 1:2,1:2,5 - CIMENTO:AREIA:BRITA)		
1.3.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32	2302,08	KG
1.3.2	AREIA	7062,93	KG
1.3.3	BRITA	5753,29	KG
1.4	ARMAÇÃO DE RADIER, AÇO EM TELA SOLDADA	66,59	KG
1.5	IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	289,80	KG
2	SUPERESTRUTURA EM LIGHT STEEL FRAMING		
2.1	AÇO ZINCADO	973,66	KG
2.2	PARAFUSO CABEÇA FLANGEADA PONTA BROCA 1/2"	40,39	KG
2.3	CHUMBADOR CB 5/16"X100MM COM PRISIONEIRO E PROLONGADOR (GRANDE)	157,29	KG
2.4	TRATAMENTO DO AÇO (ZINCAGEM A FRIO)	77,53	M2
3	PAREDES E PAINÉIS		
3.1	CHAPA DE GESSO - 12,5 MM X 1200 MM X 1800 MM	1879,61	KG
3.2	LÃ MINERAL - 12500 MM X 1200 MM X 50 MM (15M2/ROLO)	45,80	KG
3.3	MEMBRANA HIDRÓFUGA (POLIPROPILENO)	9,50	KG
3.4	OSB - 11,1 MM X 1200 MM X 2400 MM	1886,15	KG
3.5	PARAFUSO 3,5X25MM	0,63	KG
3.6	PARAFUSO 4,2X13MM	0,83	KG
3.7	PARAFUSO 4,5X45MM CHIPBOARD	0,62	KG
3.8	PARAFUSO 4,2X19MM	3,51	KG
3.9	PARAFUSO 4,2X32MM	9,61	KG
3.10	GRAMPO PARA MEMBRANA	10,59	KG

continua

3.11	CANTONEIRA 25X30X3000MM PERFURADA	1,34	KG
3.12	CANTONEIRA 25X30X3000MM	12,92	KG
4	COBERTURA E PROTEÇÕES		
4.1	TELHA ONDULADA DE FIBROCIMENTO E = 6 MM	765,26	KG
5	REVESTIMENTOS INTERNOS		
5.1	MASSA DRYWALL	125,43	KG
5.2	CONTRAPISO COM ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA (TRAÇO 1:4 - CIMENTO:AREIA) - E = 2 CM		
5.2.1	CIMENTO PORTLAND CP II-32	490,16	KG
5.2.2	AREIA	2761,65	KG
5.3	FITA DE JUNTA DE CHAPA DE GESSO (50MM X 50M)	8,40	KG
6	REVESTIMENTOS EXTERNOS		
6.1	SIDING VINÍLICO	154,80	KG
6.2	PREGO GALVANIZADO	0,69	KG

APÊNDICE E – TRANSPORTE DOS MATERIAIS NA PRÉ-OPERAÇÃO E OPERAÇÃO

Material	Localização da fábrica	Distância até a obra (km)	Massa (kg)	Massa (t)	t.km
ALVENARIA CONVENCIONAL (AC)					
PRÉ-OPERAÇÃO					
AÇO	Araucária (PR)	29,9	393,97	0,39	11,78
AREIA	Campo Largo (PR)	19,2	33.929,39	33,93	651,44
BLOCO CERÂMICO	Fazenda Rio Grande (PR)	34	14.021,95	14,02	476,75
BRITA	Campo Largo (PR)	19,2	14.573,19	14,57	279,81
CAL HIDRATADA	Ponta Grossa (PR)	126	1.420,12	1,42	178,94
FORMA PARA CONCRETAGEM - PINUS	Curitiba (PR)	12,5	6.915,82	6,92	86,45
CIMENTO PORTLAND	Rio Branco do Sul (PR)	36,9	5.821,90	5,82	214,83
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	São Paulo (SP)	417	178,02	0,18	74,23
MADEIRA PINUS	Curitiba (PR)	12,5	476,00	0,48	5,95
TELHA CERÂMICA	Fazenda Rio Grande (PR)	34	1.910,44	1,91	64,95
					t.km 2.045,13
OPERAÇÃO					
AÇO	Araucária (PR)	29,9	1,11	0,00	0,03
AREIA	Campo Largo (PR)	19,2	21.995,53	22,00	422,31
BLOCO CERÂMICO	Fazenda Rio Grande (PR)	34	13.797,94	13,80	469,13
CAL HIDRATADA	Ponta Grossa (PR)	126	1.473,48	1,47	185,66
FORMA PARA CONCRETAGEM - PINUS	Curitiba (PR)	12,5	1.228,63	1,23	15,36
CIMENTO PORTLAND	Rio Branco do Sul (PR)	36,9	2.620,19	2,62	96,69
TELHA CERÂMICA	Fazenda Rio Grande (PR)	34	2.865,66	2,87	97,43
					t.km 1.286,61
LIGHT STEEL FRAMING (LSF)					
PRÉ-OPERAÇÃO					
AÇO	Almirante Tamandaré (PR)	22,1	1.278,67	1,28	28,26
AREIA	Campo Largo (PR)	19,2	9.824,58	9,82	188,63
BRITA	Campo Largo (PR)	19,2	7.081,54	7,08	135,97
FORMA PARA CONCRETAGEM - PINUS	Curitiba (PR)	12,5	698,28	0,70	8,73
					continua

CIMENTO PORTLAND	Rio Branco do Sul (PR)	36,9	2.792,24	2,79	103,03
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	São Paulo (SP)	417	289,80	0,29	120,85
LÃ MINERAL	São Paulo (SP)	399	45,80	0,05	18,27
MASSA DRYWALL	Mogi das Cruzes (SP)	471	125,43	0,13	59,08
MEMBRANA HIDRÓFUGA	Seropédica (RJ)	778	9,50	0,01	7,39
OSB	Ponta Grossa (PR)	112	1.886,15	1,89	211,25
CHAPA DE GESSO	Mogi das Cruzes (SP)	471	1.879,61	1,88	885,30
SIDING VINÍLICO	Ponta Grossa (PR)	112	154,80	0,15	17,34
TELA DE FIBRA DE VIDRO	Araucária (PR)	24,7	8,40	0,01	0,21
TELHA DE FIBROCIMENTO	Colombo (PR)	17,5	765,26	0,77	13,39
			t.km		1.797,69
OPERAÇÃO					
AÇO	Almirante Tamandaré (PR)	22,1	18,94	0,02	0,42
LÃ MINERAL	São Paulo (SP)	399	37,79	0,04	15,08
MASSA DRYWALL	Mogi das Cruzes (SP)	471	188,15	0,19	88,62
MEMBRANA HIDRÓFUGA	Seropédica (RJ)	778	2,38	0,00	1,85
OSB	Ponta Grossa (PR)	112	1.585,83	1,59	177,61
CHAPA DE GESSO	Mogi das Cruzes (SP)	471	2.819,42	2,82	1327,94
SIDING VINÍLICO	Ponta Grossa (PR)	112	38,70	0,04	4,33
TELA DE FIBRA DE VIDRO	Araucária (PR)	24,7	12,60	0,01	0,31
TELHA DE FIBROCIMENTO	Colombo (PR)	17,5	1.147,89	1,15	20,09
			t.km		1.636,25
LIGHT WOOD FRAMING (LWF)					
PRÉ-OPERAÇÃO					
AÇO	Araucária (PR)	29,9	263,46	0,26	7,88
AREIA	Campo Largo (PR)	19,2	9.824,58	9,82	188,63
BRITA	Campo Largo (PR)	19,2	7.081,54	7,08	135,97
FORMA PARA CONCRETAGEM - PINUS	Curitiba (PR)	12,5	698,28	0,70	8,73
CIMENTO PORTLAND	Rio Branco do Sul (PR)	36,9	2.792,24	2,79	103,03
IMPERMEABILIZANTE ASFÁLTICO	São Paulo (SP)	417	289,8	0,29	120,85
LÃ MINERAL	São Paulo (SP)	399	45,8	0,05	18,27
MADEIRA PINUS	Araucária (PR)	28,4	1.916,38	1,92	54,43
MASSA COLA PARA PLACA CIMENTÍCIA	Araucária (PR)	24,7	271,2	0,27	6,70
					continua

MASSA DRYWALL	Mogi das Cruzes (SP)	471	125,43	0,13	59,08
MEMBRANA HIDRÓFUGA	Seropédica (RJ)	778	9,5	0,01	7,39
OSB	Ponta Grossa (PR)	112	1.886,15	1,89	211,25
PLACA CIMENTÍCIA	Araucária (PR)	24,7	1.273,46	1,27	31,45
CHAPA DE GESSO	Mogi das Cruzes (SP)	471	1.879,61	1,88	885,30
TELA DE FIBRA DE VIDRO	Araucária (PR)	24,7	29,25	0,03	0,72
TELHA CERÂMICA	Fazenda Rio Grande (PR)	34	1.910,44	1,91	64,95
t.km 1.904,63					
OPERAÇÃO					
AÇO	Araucária (PR)	29,9	15,6975	0,02	0,47
LÃ MINERAL	São Paulo (SP)	399	37,7875	0,04	15,08
MASSA COLA PARA PLACA CIMENTÍCIA	Araucária (PR)	24,7	67,8	0,07	1,67
MASSA DRYWALL	Mogi das Cruzes (SP)	471	188,145	0,19	88,62
MEMBRANA HIDRÓFUGA	Seropédica (RJ)	778	2,375	0,00	1,85
OSB	Ponta Grossa (PR)	112	1.585,83	1,59	177,61
PLACA CIMENTÍCIA	Araucária (PR)	24,7	318,37	0,32	7,86
CHAPA DE GESSO	Mogi das Cruzes (SP)	471	2.819,42	2,82	1327,94
TELA DE FIBRA DE VIDRO	Araucária (PR)	24,7	17,8125	0,02	0,44
TELHA CERÂMICA	Fazenda Rio Grande (PR)	34	2.865,66	2,87	97,43
t.km 1.718,98					

APÊNDICE F – CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS NO SISTEMA CONSTRUTIVO EM AC

Impactos por fase do ciclo de vida								
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxidade aquática	Ecotoxidade terrestre	Eutrofização	
Pré-operação	41,20	175,00	12.300	0,000804	773.000	213.000	1,850	
Operação	25,10	99,50	7.290	0,000499	607.000	125.000	1,020	
Pós-operação	3,92	20,70	521	0,000135	45.100	12.600	0,092	
Total	70,22	295,20	20.111	0,001438	1.425.100	350.600	2,962	
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim	
Impactos por partes da construção - pré-operação								
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxidade aquática	Ecotoxidade terrestre	Eutrofização	
Subestrutura	7,25	30,60	2.410	0,000167	97.400	31.600	0,301	
Superestrutura	11,60	53,40	3.000	0,000206	171.000	69.000	0,669	
Vedações	14,60	65,90	5.530	0,000298	193.000	54.800	0,413	
Cobertura	7,72	25,50	1.380	0,000133	311.000	57.600	0,471	
Total	41,17	175,40	12.320	0,000804	772.400	213.000	1,854	
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim	
Impactos por material de construção - pré-operação								
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxidade aquática	Ecotoxidade terrestre	Eutrofização	
Aço	3,640	13,30	758,00	0,0000456	97.700	38.300	0,541	
Areia	0,951	4,73	143,00	0,0000127	7.740	2.120	0,0303	
Bloco cerâmico	9,420	41,90	3.340,00	0,0002200	119.000	26.200	0,289	
Brita	0,890	3,81	151,00	0,0000097	7.880	2.230	0,0329	
Cal hidratada	0,395	1,56	67,50	0,0000048	19.700	5.600	0,0128	
Forma para concretagem - pinus	5,020	26,50	833,00	0,0001160	51.700	25.300	0,133	

continua

Cimento Portland	10,900	50,90	5.150,00	0,0001290	104.000	27.700	0,231
Impermeabilizante asfáltico	1,510	4,60	243,00	0,0000850	27.100	6.220	0,0828
Madeira pinus	0,829	4,41	121,00	0,0000137	29.100	11.700	0,0301
Telha cerâmica	6,610	20,30	1.230,00	0,0001170	269.000	42.600	0,388
Tratamento da madeira (CCA)	0,259	0,63	19,20	0,0000012	12.500	2.530	0,0519
Transporte	0,688	2,64	263,00	0,0000498	27.500	22.600	0,0313
Total	41,112	175,28	12.318,70	0,00080452	772.920	213.100	1,8541
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por material de construção - operação							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxidade aquática	Ecotoxidade terrestre	Eutrofização
Aço	0,010	0,037	2,13	0,0000001	275	108	0,00
Areia	0,617	3,060	92,70	0,0000083	5.020	1.380	0,02
Bloco cerâmico	9,270	41,300	3.280,00	0,0002160	117.000	25.800	0,28
Cal hidratada	0,410	1,620	70,00	0,0000050	20.500	5.810	0,01
Forma para concretagem - pinus	2,120	11,300	310,00	0,0000350	74.500	30.000	0,08
Cimento Portland	3,590	16,700	1.690,00	0,0000422	34.200	9.070	0,08
Telha cerâmica	9,910	30,500	1.850,00	0,0001750	403.000	63.900	0,58
Transporte	0,433	1,660	165,00	0,0000313	17.300	14.200	0,02
Total	26,360	106,177	7.459,83	0,0005129	671.795	150.268	1,07
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por destino final - pós-operação							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxidade aquática	Ecotoxidade terrestre	Eutrofização
Aterro de inertes	3,3	18,6	376	0,000128	32.900	9.690	0,07
Aterro sanitário	-	-	-	-	-	-	-
Aterro de resíduos perigosos	0,7	2,1	144	0,000007	12.200	2.910	0,02
Reciclagem	-	-	-	-	-	-	-

continua

Total		4,0	20,7	520	0,000135	45.100	12.600	0,09
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim	

APÊNDICE G – CONTRIBUIÇÃO DOS PROCESSOS NO SISTEMA CONSTRUTIVO EM LWF

Impactos por fase do ciclo de vida							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Pré-operação	33,6	132,0	7.540	0,000595	938.000	269.000	1,75
Operação	21,9	75,3	3.950	0,000336	734.000	178.000	0,98
Pós-operação	4,1	14,0	1.170	0,000068	183.000	9.970	0,30
Total	59,6	221,3	12.660	0,000999	1.855.000	456.970	3,03
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por partes da construção - pré-operação							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Subestrutura	7,65	32,5	2.610,00	0,000227	113.000	36.200	0,34
Superestrutura	4,75	20,5	731,00	0,000064	165.000	58.700	0,47
Vedações	13,5	53,6	2.820,00	0,000171	348.000	116.000	0,48
Cobertura	7,72	25,5	1.380,00	0,000133	312.000	57.700	0,47
Total	33,62	132,1	7.541,00	0,000595	938.000	268.600	1,76
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por material de construção - pré-operação							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Aço	2,440	8,88	507,00	0,0000305	65.300	25.600	0,362
Areia	0,280	1,37	41,40	0,0000037	2.240	615	0,009
Brita	0,430	1,85	73,30	0,0000047	3.830	1.080	0,016
Forma para concretagem - pinus	0,507	2,68	84,20	0,0000118	5.220	2.560	0,014

continua

Cimento Portland	4,820	23,00	2.390,00	0,0000614	47.800	12.900	0,102
Impermeabilizante asfáltico	1,760	5,14	260,00	0,0001380	40.400	9.550	0,121
Lã mineral	0,770	3,61	122,00	0,0000107	8.540	1.460	0,029
Madeira pinus	3,310	17,70	484,00	0,0000547	116.000	46.900	0,120
Massa cola para placa cimentícia	0,220	0,92	72,90	0,0000029	2.880	941	0,006
Massa drywall	0,360	1,03	59,30	0,0000053	16.100	1.210	0,014
Membrana hidrófuga	0,060	0,21	17,20	0,0000000	127	1	0,001
OSB	4,380	21,00	677,00	0,0000529	185.000	63.900	0,182
Placa cimentícia	0,990	4,09	309,00	0,0000118	12.700	4.130	0,025
Chapa de gesso	4,040	12,30	649,00	0,0000353	72.600	23.700	0,113
Tela de fibra de vidro	0,950	3,06	242,00	0,0000042	13.400	608	0,015
Telha cerâmica	6,610	20,30	1.230,00	0,0001170	269.000	42.600	0,388
Tratamento da madeira (CCA)	1,040	2,54	77,30	0,0000049	50.300	10.200	0,209
Transporte	0,641	2,46	245,00	0,0000464	25.600	21.000	0,029
Total	33,608	132,13	7.540,60	0,0005962	937.037	268.955	1,755
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por material de construção - operação							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Aço	0,15	0,53	30,2	0,000002	3.890	1.530,0	0,022
Lã mineral	0,47	2,44	69,2	0,000009	6.170	1.070,0	0,021
Massa cola para placa cimentícia	0,06	0,23	18,2	0,000001	721	235,0	0,001
Massa drywall	0,55	1,54	88,8	0,000008	24.200	1.810,0	0,021
Membrana hidrófuga	0,01	0,05	4,3	0,000000	32	0,4	0,000
OSB	3,62	17,50	544,0	0,000043	154.000	53.500,0	0,140

continua

Placa cimentícia	0,25	1,02	77,3	0,000003	3.160	1.030,0	0,006
Chapa de gesso	5,76	17,40	904,0	0,000052	106.000	35.200,0	0,154
Tela de fibra de vidro	0,58	1,86	147,0	0,000003	8.140	370,0	0,009
Telha cerâmica	9,91	30,50	1.850,0	0,000175	403.000	63.900,0	0,581
Transporte	0,58	2,22	221,0	0,000042	23.100	19.000,0	0,026
Total	21,94	75,29	3.954,0	0,000338	732.413	177.645,4	0,981
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por destino final - pós-operação							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Aterro de inertes	0,873	4,92	99,4	0,000034	8.710	1.570	0,019
Aterro sanitário	1,930	4,16	799,0	0,000018	152.000	2.080	0,241
Aterro de resíduos perigosos	1,180	4,16	266,0	0,000013	22.500	5.300	0,039
Reciclagem	0,144	0,98	14,8	0,000003	584	141	0,001
Total	4,127	14,22	1179,2	0,000068	183.794	9.091	0,300

Impactos por fase do ciclo de vida							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Pré-operação	54,30	262,0	8.130	0,000576	909.000	399.000	2,780
Operação	15,30	57,4	2.890	0,000202	407.000	132.000	0,596
Pós-operação	4,68	16,8	1.310	0,000073	202.000	10.800	0,332
Total	74,28	336,2	12330	0,0008514	1518000	541800	3,708
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por partes da construção - pré-operação							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Subestrutura	7,44	31,8	2.570	0,0002270	112.000	36.000	0,335
Superestrutura	27,00	144,0	2.050	0,0001380	344.000	199.000	1,560
Vedações	12,10	49,0	2.470	0,0001510	327.000	111.000	0,428
Cobertura	7,77	37,1	1.050	0,0000608	126.000	52.500	0,461
Total	54,31	261,9	8.140	0,0005768	909.000	398.500	2,784
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por material de construção - pré-operação							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Aço	11,00	40,40	2.300,00	0,0001470	311.300	124.000,00	1,740
Areia	0,23	1,21	32,00	0,0000036	1.980	575,00	0,008
Brita	0,31	1,45	50,50	0,0000046	3.190	988,00	0,014
Forma para concretagem - pinus	0,51	2,68	84,20	0,0000117	5.220	2.560,00	0,013
Cimento Portland	4,82	23,00	2.390,00	0,0000614	47.800	12.900,00	0,102
Impermeabilizante asfáltico	1,74	5,09	257,00	0,0001380	40.300	9.540,00	0,120
Lã mineral	0,57	2,95	83,90	0,0000105	7.480	1.300,00	0,025
Massa drywall	0,36	1,03	59,20	0,0000053	16.100	1.210,00	0,014
							continua

Membrana hidrófuga	0,06	0,21	17,20	0,0000000	127	1,45	0,001
OSB	4,31	20,80	646,00	0,0000513	184.000	63.600,00	0,167
Chapa de gesso	4,02	12,20	645,00	0,0000352	72.500	23.700,00	0,113
Siding vinílico	0,83	3,64	285,00	0,0000001	7.770	383,00	0,008
Tela de fibra de vidro	0,27	0,88	69,50	0,0000012	3.840	175,00	0,004
Telha de fibrocimento	2,37	8,30	624,00	0,0000323	55.600	12.200,00	0,142
Tratamento de aço (galvanização)	22,30	136,00	357,00	0,0000303	127.000	126.000,00	0,286
Transporte	0,61	2,32	231,00	0,0000438	24.200	19.900,00	0,028
Total	54,30	262,16	8.131,50	0,0005763	908.407	399.032,45	2,785
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por material de construção - operação							
	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Aço	0,18	0,64	36,40	0,0000022	4.700	1.840,00	0,030
Lã mineral	0,47	2,44	69,20	0,0000087	6.170	1.070,00	0,020
Massa drywall	0,55	1,54	88,80	0,0000079	24.200	1.810,00	0,020
Membrana hidrófuga	0,01	0,05	4,30	0,0000000	32	0,36	0,000
OSB	3,62	17,50	544,00	0,0000431	154.000	53.500,00	0,140
Chapa de gesso	5,76	17,40	904,00	0,0000516	106.000	35.200,00	0,150
Siding vinílico	0,21	0,91	71,20	0,0000000	1.940	95,70	0,000
Tela de fibra de vidro	0,27	0,88	69,50	0,0000012	3.840	175,00	0,000
Telha de fibrocimento	3,35	11,80	885,00	0,0000471	81.200	17.900,00	0,200
Tratamento de aço (galvanização)	0,35	2,14	5,61	0,0000005	2.000	1.980,00	0,000
Transporte	0,55	2,11	210,00	0,0000398	22.000	18.100,00	0,025
Total	15,32	57,41	2.888,01	0,0002021	406.082	131.671,06	0,585
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim
Impactos por destino final - pós-operação							

continua

	Acidificação aquática	Acidificação terrestre	Aquecimento global	Depleção da camada de ozônio	Ecotoxicidade aquática	Ecotoxicidade terrestre	Eutrofização
Aterro de inertes	0,71	4,01	81	0,0000276	7.100	2.090	0,02
Aterro sanitário	2,13	4,6	882	0,00002	168.000	2.290	0,27
Aterro de resíduos perigosos	1,33	4,7	300	0,0000167	25.300	5.980	0,04
Reciclagem	0,51	3,49	47	0,0000091	1.600	440	0,00
Total	4,68	16,8	1.310	0,0000734	202.000	10.800	0,33
Unidade	kg SO2 eq.	kg SO2 eq.	kg CO2 eq.	kg CFC-11 eq.	kg TEG water	kg TEG soil	kg PO4 P-lim

ANEXO A – ÍNDICES PARA MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Material	Perdas	Fonte	Massa específica (kg/m³)	Fonte
Aço - light steel framing	1,020	(13)		
Aço CA-50 - 6,3 mm	1,370	(9)	7.860,00	(5)
Aço CA-60 - 5,0 mm	1,130	(9)	7.850,00	(1)
Aço CA-50 - 8,0 mm	1,270	(9)	7.858,00	(5)
Aço CA-50 - 10,0 mm	1,140	(9)	7.856,00	(5)
Aditivo para argamassa			1.020,00	(8)
Alvenaria - cerâmica	1,170	(1)	1.400,00	(1)
Areia	1,500	(1)	1.515,00	(1)
Argamassa industrializada - genérica	1,130	(9)		
Brita	1,400	(1)	1.650,00	(1)
Cal hidratada	1,460	(9)	2.210,00	(6)
Chapa de compensado	1,150	(1)	550,00	(1)
Chapa de OSB	1,010	(12)	681,00	(11)
Cimento Portland	1,400	(1)	1.950,00	(1)
Lã mineral	1,140	(12)	10,35	(11)
Lajota - cerâmica	1,170	(9)		
Madeira serrada	1,464	(2)	550,00	(3)
Membrana hidrófuga	1,200	(12)		
Tela de fibra de vidro	1,270	(12)		
Tela soldada para radier	1,247	(12)		
Telha - cerâmica	1,110	(7)	1.900,00	(1)
Telha - fibrocimento	1,100	(1)	1.920,00	(1)
Tinta - genérica	1,150	(1)		
Placa cimentícia	1,002	(12)	1.700,00	(11)
Placa de gesso	1,350	(1)	750,00	(11)

(1) Fonte: Tavares (2006).

(2) Fonte: Junior, Rocha e Trugilho (2013).

(3) Fonte: Tecverde (2016).

(4) Fonte: Barboza e Bastos (2008).

(5) Fonte: Gerdau (2018).

(6) Fonte: Votorantim Cimentos (2014).

(7) Fonte: Pini (2008).

(8) Fonte: Vedacit (2018).

(9) Fonte: Agopyan (1998)

(10) Fonte: USP/EESC (2008).

(11) Fonte: SiNAT (2018b).

(12) Fonte: Calculado em projeto:

- Lã mineral: quantidade adquirida (15 m²/rolo): 90 m².

- Membrana hidrófuga: quantidade adquirida (15 m²/rolo): 45 m².

- OSB: quantidade adquirida: 210,24 m².

- Placa cimentícia: quantidade adquirida: 77,76 m².

- Tela de fibra de vidro: quantidade adquirida (50m x 1m/tela): 100 m.

- Tela soldada: quantidade necessária: 59,71 m² - quantidade adquirida (2,45m x 7,60m/tela): 74,48 m².

(13) Fonte: Mass (2017).